

УДК 622.831:550.3

**ВЗАИМОСВЯЗЬ АКУСТИЧЕСКОЙ ДОБРОТНОСТИ
С ПРОЧНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ ИЗВЕСТНЯКОВ**

А. С. Вознесенский, Я. О. Куткин, М. Н. Красилов

*Московский государственный горный университет, E-mail: al48@mail.ru,
Ленинский проспект, 6, 119991, г. Москва, Россия*

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований взаимосвязей предела прочности и акустической добротности горных пород на образцах известняков Касимовского месторождения. Сравниваются две методики с определением предела прочности прямым методом и интерполяцией. Показано преимущество использования акустической добротности по сравнению с определением скоростей упругих волн при оценке нарушенности и остаточной прочности пород. Полученные зависимости могут быть использованы для оценки остаточной прочности и ресурса конструктивных элементов систем разработки — целиков и кровли подземных выработок.

Горная порода, прочность, акустическая добротность, затухание, динамические характеристики, нарушенность

Акустические свойства горных пород всегда находятся в поле зрения исследователей. Их знание позволяет определять также и другие их свойства, например прочностные и упругие. Акустические свойства пород наиболее часто описываются кинематическими характеристиками продольных и поперечных упругих волн, а именно скоростями их распространения. Для различных типов горных пород наиболее интенсивно исследовались взаимосвязи их кинематических характеристик с упругими свойствами [1–4], а также с напряженным состоянием [5]. Изучались также связи динамических акустических характеристик (коэффициента затухания ультразвуковых волн) с упругими свойствами [6, 7]. Недостатком использования коэффициента затухания является его частотная зависимость, что не дает возможность непосредственно сравнивать между собой результаты измерений, проведенных на различных частотах. Обобщенными характеристиками, свободными от этого недостатка, являются акустическая добротность Q и декремент затухания. Эти величины сохраняют постоянство в широком диапазоне частот, что дает существенные преимущества по сравнению с коэффициентом затухания. Связь акустической добротности со скоростями упругих волн исследовалась, в частности, в [8]. Влияние амплитуды акустических колебаний в горных породах на скорости упругих волн и декремент затухания рассмотрено в [9], где отмечается, что затухание по сравнению со скоростью волн более чувствительно к изменению амплитуды и что такие эффекты могут быть использованы для диагностики состояния трещиноватых и пористых пород.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-05-00362а).

Установление связей динамических акустических характеристик с прочностными важно для практики, поскольку позволяет оценивать устойчивость геоконструкций, таких как целики и кровля подземных выработок, борта и откосы карьеров. В [10] показано, что путем измерения добротности можно определить предел прочности анкерного крепления кровли. Ясно, что такие взаимосвязи должны существовать, поскольку на добротность пород и на их прочностные свойства влияет нарушенность, обусловленная трещиноватостью. Чем больше трещиноватость, тем больше нарушенность и тем меньше предел прочности пород. Оценивая акустическую добротность горных пород, можно оценивать и их прочностные свойства, а также остаточную прочность, резерв и устойчивость всей конструкции, элементами которой они являются.

В статье описаны методики и результаты экспериментальных исследований взаимозависимостей предела прочности $\sigma_{ucs}(Q)$ при одноосном сжатии (uniaxial compression strength, UCS) от акустической добротности Q горных пород для известняков Касимовского месторождения, расположенного в Рязанской области России.

МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методики лабораторных исследований взаимозависимостей акустической добротности с прочностными и упругими свойствами горных пород базируются на искусственном внесении различной поврежденности в образцы горных пород, измерении акустической добротности и последующем определении упругих свойств и предела прочности при одноосном сжатии.

Различная поврежденность геоматериала может создаваться несколькими способами. К наиболее распространенным из них можно отнести нагревание образцов до некоторой температуры [11 – 13], а также однократное или многократное циклическое нагружение до определенных механических напряжений.

Вычисление акустической добротности Q осуществляется по коэффициентам затухания акустических сигналов, которые могут измеряться различными способами. В одном из них по амплитудам, уменьшающимся с расстоянием, измеряется коэффициент затухания δ_s упругих волн при их распространении в горной породе. В другом коэффициент затухания δ_t измеряется по уменьшению во времени амплитуд свободных колебаний, регистрируемых в одной точке образца и вызванных одиночным ударом или ультразвуковым (УЗ) импульсом. В данной работе использовано определение добротности по затуханию δ_s .

В этом случае пространственный коэффициент затухания упругих волн находится по формуле

$$\delta_s = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \left[\frac{p(x_1)}{p(x_2)} \right],$$

где $x_1, x_2, p(x_1), p(x_2)$ — расстояния и соответствующие амплитуды сигналов.

Временной коэффициент затухания свободных колебаний рассчитывается по формуле $\delta_t = v\delta_s$, где v — скорость распространения упругих волн.

Акустическая добротность образца горной породы вычисляется следующим образом:

$$Q = \frac{\pi}{\theta} = \frac{\pi f_0}{\delta_t} = \frac{\pi f_0}{\delta_s v},$$

где θ — декремент затухания; f_0 — частота регистрируемых колебаний.

Для вывода взаимозависимости между остаточным пределом прочности σ_{ucs} и добротностью Q использованы две методики. Согласно первой, проводились ультразвуковые испытания двух пар образцов разной длины для определения их динамических свойств — коэффициента затухания δ_s , а по нему — добротности Q . Затем на прессе устанавливалось начальное значение предела прочности σ_0 первой пары образцов. После этого вторая пара образцов несколько раз подвергалась нагреванию до определенных температур, возрастающих при каждом последующем нагревании. При каждом цикле воздействия осуществлялось линейное во времени увеличение температуры со скоростью $20^\circ\text{C}/\text{мин}$, выдерживание образца на каждой температурной ступени в течение 1 ч и его остывание до комнатной температуры. Одновременно с нагреванием регистрировалось число импульсов акустической эмиссии N_Σ . На каждой ступени после остывания образца проводились УЗ испытания и рассчитывалась добротность. После достижения последней ступени термического нагружения и проведения УЗ испытаний данная пара образцов подвергалась испытаниям на прессе для определения остаточного предела прочности σ_{rs} . Значения остаточной прочности на промежуточных стадиях нагревания σ_{rsi} вычислялись путем интерполяции начального σ_0 и конечного σ_{rs} значений прочности с учетом количества импульсов акустической эмиссии (АЭ), накопленных на каждой ступени нагревания, а также по температуре каждой ступени.

Достоинством данной методики является то, что основные измерения проводятся на одной паре образцов. Это устраняет разброс полученных данных, связанных с различными экземплярами образцов. К недостаткам можно отнести неизвестность промежуточных значений σ_{rsi} из-за невозможности проведения прочностных испытаний на каждой ступени воздействия. Промежуточные значения остаточного предела прочности необходимо интерполировать от начальной величины σ_0 до значения остаточной прочности σ_{rsi} на i -й ступени с учетом температуры или количества импульсов АЭ для каждой ступени, накопленных при разрушающем воздействии. Такие измерения являются косвенными.

По второй методике термическое нагружение на каждой ступени осуществлялось для отдельной пары образцов, т. е. количество пар образцов равнялось количеству ступеней нагревания, включая исходную температуру. При такой методике в наибольшей степени сказывается разброс свойств отдельных экземпляров образцов. Поэтому отбор пар образцов выполнялся по значениям скорости ультразвука, не выходящим за 5% границы для всех испытываемых образцов. Для определения затухания упругих волн проводились УЗ испытания до и после разрушающего воздействия. По этим данным рассчитывалась добротность Q . После нагревания каждой пары образцов до определенных температур T_i устанавливались зависимости добротности $Q(T_i)$ и предела прочности $\sigma_{ucs}(T_i)$ от температуры нагревания для каждой ступени разрушающего воздействия, по которым строилась зависимость $Q(T)$.

Достоинство данной методики заключается в том, что известны промежуточные значения остаточной прочности σ_{rsi} , полученные прямыми измерениями на каждой ступени нагружения. Недостатком является большой разброс показаний, обусловленный тем, что испытываются разные экземпляры пар образцов, а также большое количество образцов. При подготовке эксперимента необходим тщательный отбор образцов с почти одинаковыми характеристиками, осуществляемый по УЗ испытаниям до внесения искусственных повреждений. На практике удается получить отбор образцов со скоростями, разброс которых не превышает 2–5%. Для получения объективных данных необходимо использовать обе методики.

Описание экспериментальных установок. Определение скоростей продольной и поперечной волн выполнялось в диапазоне частот 50–100 кГц на измерительном приборе “Ультразвук”, выпускаемом ООО “ЭкогеосПром” [14]. Нагревание образцов с одновременной регистрацией активности акустической эмиссии (ААЭ) происходило на экспериментальной установке [15], включающей трубчатую печь Nabertherm RT 50/250/11, нагревание в которой осуществлялось с помощью программируемого контроллера Р 320. Регистрация акустической эмиссии проводилась системой A-Line 32D с преобразователями GT-200, имеющими полосу пропускания от 130 до 200 кГц, а определение предела прочности при одноосном сжатии — на универсальной испытательной машине Instron 300 DX серии SATEC.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При проведении экспериментов по первой методике взяты две пары образцов с размерами 32×32×64 и 32×32×96 мм, одна из которых использовалась для установления начального предела прочности σ_0 ненарушенных образцов. Измерения коэффициентов затухания и добротностей выполнялись на соответствующих парах. Вторая пара подвергалась нагреванию до температур 150, 300, 500, 600, 700, 800 °С, выдержке при постоянной температуре в течение 1 ч и последующему остыванию на каждой ступени. При нагревании и выдержке регистрировалась АЭ. После нагрева до температуры 800 °С эта пара образцов испытывалась для определения остаточной прочности.

Промежуточные значения остаточной прочности на i -й ступени нагревания по первой методике вычислялись по формуле

$$\sigma_{ucsi} = \sigma_0 - (\sigma_0 - \sigma_n) \frac{N_i}{N_n}, \quad (1)$$

где σ_0 — начальный предел прочности; N_i , N_n — число импульсов i -й и последней n -й ступеней нагревания соответственно.

В другом случае они рассчитывались исходя из температуры ступеней:

$$\sigma_{ucsi} = \sigma_0 - (\sigma_0 - \sigma_n) \frac{T_i - T_0}{T_n}, \quad (2)$$

где T_0 , T_i , T_n — начальная температура, температуры i -й и последней n -й ступеней нагревания соответственно.

На рис. 1 показаны зависимости изменения скоростей распространения продольной V_p и поперечной V_s упругих волн, а также числа импульсов акустической эмиссии от температуры нагревания образца размером 32×32×64 мм. Как и следовало ожидать, при увеличении температуры нагрева происходит снижение как V_p , так и V_s . Число импульсов акустической эмиссии N_Σ при этом растет, а наибольшее их увеличение наблюдается при температурах от 300 до 500 °С. Такой скачок связан с химическими преобразованиями в известняках, что детально показано в работе [16]. Так, для нуммулитового известняка Крыма максимум активности акустической эмиссии находится в диапазоне 300–500 °С, а для Тигинского месторождения — при температуре около 800 °С. В то же время выраженного скачка скоростей упругих волн здесь не наблюдается, что говорит о плавном уменьшении скорости при увеличении температуры нагрева и отсутствии скачкообразных нарушений структуры, регистрируемых по скоростям.

При методике расчета промежуточных значений остаточной прочности по формуле (1), когда акустическая эмиссия обусловлена не только разрушением, но и химическими процессами, возникает значительная погрешность для пород, имеющих сильно выраженные локальные максимумы АЭ в отдельных сравнительно узких участках температурного диапазона.

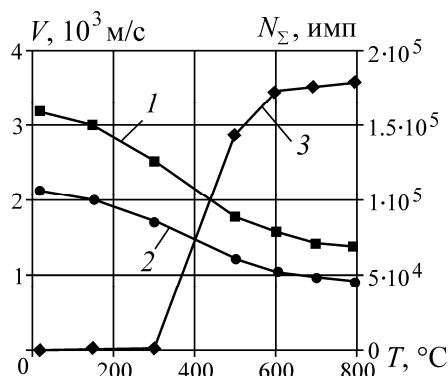


Рис. 1. Изменение скорости продольной V_p (1), поперечной V_s (2) упругих волн и числа импульсов акустической эмиссии N_Σ (3) в зависимости от температуры нагрева образца размером $32 \times 32 \times 64$ мм при испытаниях по первой методике

Возможно ли интерполировать поврежденность материала и остаточный предел прочности с помощью акустической эмиссии, предполагая, что одному акту акустической эмиссии соответствует один акт разрушения? На рис. 2 показаны зависимости ААЭ и числа импульсов АЭ от температуры для исследуемых известняков.

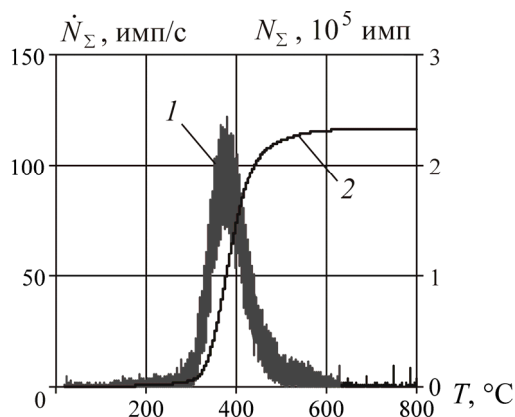


Рис. 2. Зависимости ААЭ \dot{N}_Σ (1) и числа импульсов АЭ N_Σ (2) образца известняка Касимовского месторождения от температуры нагрева

Наибольшие значения ААЭ (1) и крутой подъем кривой 2 находятся в узком диапазоне между 300 и 500 °С. Такое увеличение может быть связано либо с химическими превращениями, либо с фазовыми переходами отдельных минералов без изменения прочности. В то же время акустические кинематические характеристики в этой области температур не испытывают каких-либо скачкообразных изменений. Для таких горных пород интерполяция значений остаточной прочности по АЭ неприемлема. Поэтому данная методика применима лишь для тех горных пород, ААЭ которых не испытывает резких возрастаний или спадов и постоянна во всем диапазоне температур. Такой случай описан в [17], где аналогичные исследования проводились на модельных образцах из песчано-цементной смеси.

При проведении экспериментов по второй методике взято 7 пар образцов разной длины с размерами $32 \times 32 \times 64$ и $32 \times 32 \times 96$ мм. Одна из них использовалась для определения предела прочности ненарушенных образцов. Остальные 6 пар подвергались нагреванию до температур 150, 300, 500, 600, 700, 800 °С с регистрацией количества импульсов АЭ.

После нагрева до своих температур у каждой пары образцов путем их разрушения определялось значение остаточной прочности σ_{rsi} . На рис. 3 показаны зависимости скоростей упругих волн от температуры нагрева.

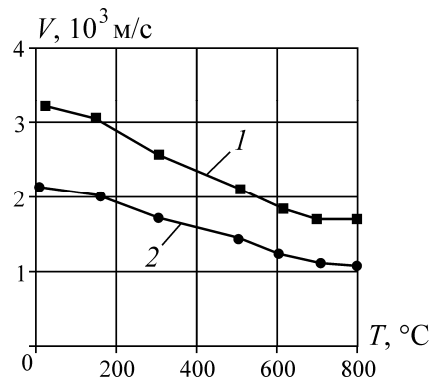


Рис. 3. Изменение скоростей продольных V_p (1) и поперечных V_s (2) упругих волн в зависимости от температуры нагрева образцов размером $32 \times 32 \times 64$ мм, полученные по второй методике

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДВУХ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ

Рассмотрим различия, получаемые при определении предела прочности по двум описанным методикам. На рис. 4 представлены такие зависимости.

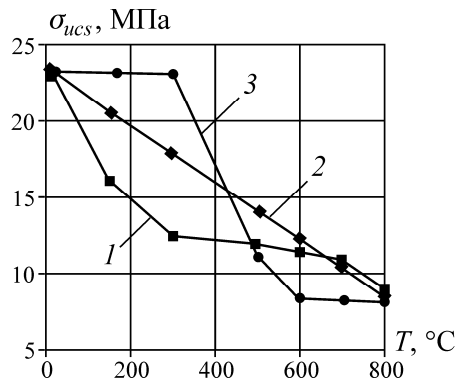


Рис. 4. Зависимости предела прочности при одноосном сжатии σ_{ucs} от температуры, построенные по второй (1) и первой методикам (2 — в пересчете через температуру T , 3 — в пересчете через число импульсов акустической эмиссии N_{Σ})

Из-за сильного влияния зависимости числа импульсов АЭ от температуры (см. рис. 2), кривая зависимости предела прочности I , построенная по второй методике, и кривая 3, построенная по первой методике и по формуле (1), различаются в значительной степени. Ближе между собой кривые 1 и 2, последняя из которых построена путем аппроксимации с учетом температуры нагревания.

Расчеты, полученные по первой методике, предусматривающей интерполяцию предела прочности пород по акустической эмиссии и температуре нагрева, в значительной части кривой отличаются от данных, полученных по второй методике, когда значения предела прочно-

сти при одноосном сжатии определяются путем прямых измерений. При этом аппроксимация с помощью АЭ дает неприемлемые различия, а через значения температур нагрева совпадение ближе. Для получения большей достоверности данных для этого типа пород следует рекомендовать вторую методику измерений, предусматривающую прямое измерение остаточной прочности.

СКОРОСТИ УПРУГИХ ВОЛН И АКУСТИЧЕСКАЯ ДОБРОТНОСТЬ ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Сравнение зависимостей скоростей продольной и поперечной упругих волн от температуры, полученных по первой и второй методикам измерений и приведенных на рис. 1, 3 соответственно, говорит об их схожести в одном и другом случае. Увеличение температуры приводит к уменьшению скоростей, причем это уменьшение происходит плавно, без резких скачков. Можно отметить, что скорости упругих волн в целом реагируют на изменения в структуре пород и могут использоваться для оценки нарушенности последних. В то же время каких-то особых изменений здесь не наблюдается, хотя такие изменения (см. рис. 2) должны быть при температурах выше 300–500 °С, где происходит существенное увеличение ААЭ.

Оценим чувствительность скоростей упругих волн как информативных параметров путем сравнения их зависимости от температуры с аналогичными температурными зависимостями акустической добротности Q пород.

На рис. 5 представлены зависимости коэффициента затухания δ_s и добротности породы Q от температуры, рассчитанные по второй методике.

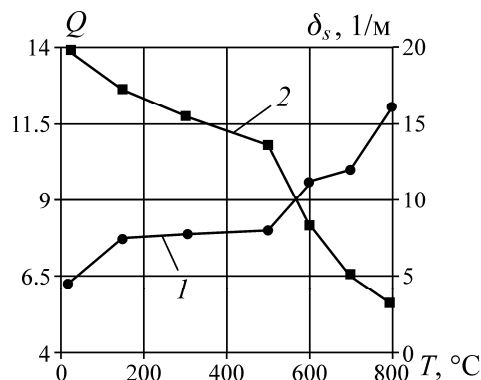


Рис. 5. Зависимости пространственного коэффициента затухания (1) и добротности породы Q (2) от температуры по второй методике

Кривые демонстрируют монотонное увеличение затухания и уменьшение добротности при увеличении температуры, до которой были нагреты образцы. При температурах свыше 500 °С наблюдается более резкий спад величины Q , чем при температурах ниже этого значения. Такого изменения скоростей на рис. 1, 3 не наблюдалось. Объяснением подобного поведения кривых являются обратимые и необратимые процессы, происходящие при нагревании.

Обратимые процессы могут быть связаны с кварцем, который содержится в известняках. При температурах до 570 °С происходит переход β -кварца в α -кварц. АЭ в этом случае будет возникать каждый раз при повторных нагреваниях без заметного изменения прочности.

К необратимым процессам относятся химические преобразования. У известняков выше 600 °С начинается диссоциация кальцита по реакции $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$, в результате которой образуются углекислый газ (до 44% по массе от исходного материала) и рыхлый низкопрочный оксид кальция [18], что вызывает необратимое снижение прочности известняка. Химиче-

ские процессы происходят на микроуровне, а возникающая при этом АЭ находится за пределами диапазона частот регистрирующей аппаратуры. Похожее явление отмечено и у гипсосодержащих пород [19, 20], где после увеличения АЭ в диапазоне температур 80–120 °С происходит ее спад при температурах 130–250 °С, хотя удаление химически связанной воды наблюдается именно в этом диапазоне. Поэтому при химических процессах АЭ часто уменьшается, т. е. накопление повреждений и снижение прочности в данном случае происходят без заметного увеличения АЭ и даже при ее снижении.

На основании этого можно сделать вывод, что применение методики, основанной на интерполяции прочности по акустической эмиссии, дает большие погрешности и следует применять вторую методику, основанную на прямых измерениях.

При анализе кривых на рис. 5 можно заметить, что в диапазоне температур 500–800 °С добротность Q уменьшается от 11 до 5, т. е. в 2.2 раза. Из данных, приведенных на рис. 3, в том же диапазоне температур скорость продольных волн уменьшается от 2100 до 1700 м/с или в 1.24 раза, при этом скорость поперечных волн — от 1400 до 1100 м/с или в 1.27 раза. При одном и том же уменьшении остаточной прочности относительное уменьшение добротности больше, что определяет ее более высокую чувствительность и информативность по отношению к прочности и нарушенности по сравнению со скоростями распространения упругих волн.

В целом можно отметить, что использование в качестве информативного параметра контроля акустической добротности позволяет выявлять процессы разрушения геоматериала, не отслеживаемые по его кинематическим характеристикам — скоростям продольных и поперечных волн.

Конечной целью данных исследований является установление взаимосвязей между пределом прочности горных пород и их акустической добротностью. На рис. 6 представлена такая зависимость, полученная по второй методике исследований. Экспериментальные точки аппроксимированы экспонентой вида

$$\sigma_{ucs} = 0.00107e^{-0.675Q} + 10.547, \text{ МПа}$$

при коэффициенте детерминации $R^2 = 0.973$.

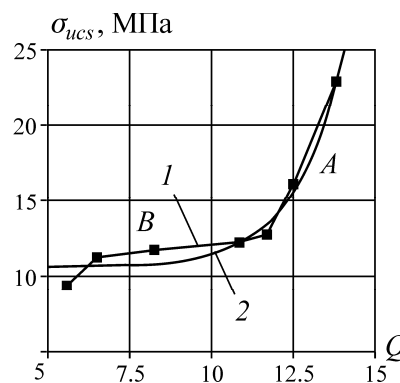


Рис. 6. Взаимосвязь добротности Q и предела прочности при одноосном сжатии σ_{ucs} (1) и с помощью сглаживающей экспоненциальной функции (2)

Зависимости Q и δ_s на рис. 5 четко разделяются на две области — до 500 °С и после, что обусловлено особенностями процессов при нагревании в этих диапазонах температур. Эти особенности на рис. 6 также проявляются на кривой 1 в виде двух участков — A и B, отличающихся

ся друг от друга наклоном. Обращает на себя внимание участок *B*, наклон на котором меньше, чем на участке *A*. Здесь большему изменению добротности соответствует меньшее изменение предела прочности. Именно этот участок будет обладать повышенной чувствительностью добротности по отношению к пределу прочности.

Аппроксимация опытных данных зависимостью, представленной кривой 2, сделана для оценки соотношения между добротностью и прочностью в целом, поэтому такая зависимость не разделяется на отдельные участки.

Полученные зависимости дают возможность следить за изменениями добротности горных пород и по ее изменениям оценивать их остаточную прочность без разрушения пород. Экстраполяция такой зависимости по времени позволит оценить ресурс конструкции и спрогнозировать разрушение конструктивных элементов систем разработки уже на ранних стадиях их существования.

ВЫВОДЫ

Рассмотрены две методики определения влияния поврежденности, вносимой нагреванием, на кинематические и динамические характеристики образцов известняков Касимовского месторождения. Показано, что для этих пород методика определения взаимозависимости между добротностью и пределом остаточной прочности, связанная с интерполяцией изменения остаточной прочности на основе измерения акустической эмиссии при нагревании образцов, дает существенные погрешности. Предпочтение отдано методике прямых измерений остаточного предела прочности.

Акустическая добротность является более информативной величиной по сравнению со скоростями распространения упругих волн при оценке степени поврежденности геоматериала при его разрушении. Ее использование в качестве параметра контроля прочности позволяет выявлять процессы разрушения, неразличимые по кинематическим характеристикам — скоростям продольных и поперечных упругих волн.

Получена зависимость между акустической добротностью и пределом прочности на одноосное сжатие известняков Касимовского месторождения, позволяющая оценивать предел прочности породы по ее добротности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Протогьяконов М. М., Тедер Р. И., Ильницкая Е. И. и др. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород: справ. пособие. — М.: Недра, 1981.
2. Дортман Н. Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. — М.: Недра, 1964.
3. Александров К. С., Беликов Б. П., Рыжова Т. В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. — М.: Недра, 1970.
4. Chaki S., Takarli M. and Agbodjan W.P. Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions, *Construction and Building Materials*, 2008, Vol. 22 (7).
5. Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Розенбаум М. А. и др. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок / отв. ред. М. А. Гузев. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
6. Меркулова В. М., Пигулевский Е. Д., Цаплев В. М. Измерение поглощения звука в горных породах при одноосном сжатии // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. — 1972. — № 3.

7. Меркулова В. М. Изменение коэффициента затухания ультразвука в горных породах после нагрева // Акуст. журн. АН СССР. — 1973. — № 6.
8. Tittman 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 Conference (Supplement 3, Geochimica et Cosmochimica Acta), The M. I. T. Press, 1972, Vol. 3.
9. Машинский Э. И. Аномалии затухания амплитуды акустических волн малой интенсивности в горных породах // ФТПРПИ. — 2008. — № 4.
10. 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 Всерос. конф. с участием иностр. ученых. 7-11 октября 2013. — Новосибирск: ИГД им. Н. А. Чинакала СО РАН, 2013.
11. 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.
12. David C., Menéndez B. and Darot M. Influence of stress-induced and thermal cracking on physical properties and microstructure of La Peyratte granite, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, Vol. 36 (4).
13. Mahmutoglu Y. Mechanical behaviour of cyclically heated fine grained rock, Rock Mechanics and Rock Engineering, 1998, Vol. 31 (3).
14. Прибор для определения скорости прохождения упругих акустических волн “Ультразвук” [Электронный документ] <http://www.ecogeospro.ru/product/issled/acustik/>.
15. Вознесенский А. С., Шкуратник В. Л., Вильямов С. В., Винников В. А. Установка для акустоэмиссионных исследований горных пород при их нагревании // ГИАБ. — 2007. — №12.
16. Вильямов С. В., Вознесенский А. С., Набатов В. В., Шкуратник В. Л. Термоакустическая эмиссия известняков как инструмент распознавания их принадлежности конкретному месторождению // ГИАБ. — 2009. — № 11.
17. Вознесенский А. С., Куткин Я. О., Красилов М. Н. О возможности оперативной оценки состояния анкерного крепления и кровли подземных горных выработок акустическими методами Ч. I // Научные труды УкрНДМИ НАН Украины. — 2013. — № 13.
18. Монастырев А. В. Производство извести. — М.: Высш. шк., 1971.
19. Вознесенский А. С., Вильямов С. В. Особенности акустоэмиссионных сигналов гипсосодержащих пород при нагревании // ГИАБ. — 2008. — № 8.
20. Шкуратник В. Л., Вознесенский А. С., Набатов В. В., Вильямов С. В. Об идентификации генотипов горных пород по их акустоэмиссионному отклику на термическое воздействие. Ч. I // Научные труды УкрНДМИ НАН Украины. — 2009. — № 5.

Поступила в редакцию 11/XI 2014