

УДК 622.831:542:34

**О ВОЗМОЖНОСТИ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ  
СОСТОЯНИЯ АНКЕРНОГО КРЕПЛЕНИЯ И КРОВЛИ  
ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК  
АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

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

*(ФГБОУ ВПО МГГУ, г. Москва, Россия)*

**Устинов К. Б.**

*(ФГБУН ИПМех РАН, г. Москва, Россия)*

*Обговорюється можливість визначення ресурсу залишкової міцності анкерного кріплення за величиною його механічної добротності, що визначається експериментально. Розглядається відповідна методика на прикладі встановлення в лабораторному експерименті залежності між добротністю і ресурсом залишкової міцності.*

*We discuss the capability of determining the structural strength of roof bolting as the function of its mechanical quality factor determined experimentally. The technique is the case study to determine the dependence between the quality factor of roof bolting and its structural strength in laboratory experiments.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Для контроля анкерной крепи массива пород вокруг выработок в настоящее время используется ряд методов. Один из них основан на определении усилия вытягивания анкера [1]. Этот метод является трудоемким и небезопасным для персонала. Другие относятся к области неразрушающего контроля и основаны на регистрации отраженного ультразвукового импульса [2, 3] и на анализе акустического отклика анкера на ударное воздействие. Результаты использования последнего описаны, в частности, в

[4, 5]. Здесь информативными параметрами являются частота и амплитуда спектрального максимума акустического отклика. По этим параметрам делается заключение о натяжении анкера и его связи с массивом пород. При оценке состояния не только анкерного крепления, но и всей системы «анкерное крепление – кровля выработки» интерес представляет оценка остаточного ресурса прочности этой системы.

Следует отметить, что прогнозирование ресурса подразумевает определение наработки объекта от начала или возобновления эксплуатации до наступления предельного состояния [6]. В зависимости от объекта он может измеряться в единицах времени, расстояния, произведенной продукции. Традиционно такая оценка касается каких-либо технических объектов, а оценка прогнозирования ресурса относится к установлению величины промежутка времени от начала эксплуатации или, начиная от последней инспекции, до отказа. В случае природных или природно-техногенных объектов, к которым относится массив пород вокруг выработок с анкерным креплением, эта задача усложняется, поскольку в данном случае неизвестно внешнее воздействие. Для случая, когда речь идет о какой-либо определенной конструкции, можно попытаться определить упоминаемый в этой работе ресурс остаточной прочности для определенного момента времени, когда производится инспекция объекта.

Заметим, что в [7] определяется резерв прочности как разность между обобщенными прочностью и нагрузкой, т. е. он зависит от двух величин. В нашем случае предлагается определять именно ресурс остаточной прочности  $R$  и характеризовать функцией, меняющей свое значение от 1 до 0 в процессе накопления повреждений и снижения прочности до 0.

Исследованию прочностных свойств горных пород, других материалов и оценки этих свойств путем измерения параметров различных геофизических полей посвящено значительное количество работ. Достаточно упомянуть [8], где прочностные свойства предлагается оценивать по параметрам термоакустической эмиссии, а также [9, 10, 11], где прочностные свойства пород оцениваются по корреляционным связям с акустическими и другими характеристиками. Но такие свойства пород, как скорость

распространения упругих волн или электрическое сопротивление зависят от величины действующих напряжений, что будет вносить значительную погрешность в результаты оценки. Требуются оценки, в меньшей степени зависящие от внешних условий и в большей степени характеризующие свойства материала.

Поскольку прочностные свойства горных пород связаны с их трещиноватостью и нарушенностью, которые определяют также затухание упругих волн в механической системе «порода-крепь», интерес представляет определение связи прочностных свойств с параметрами затухания – добротностью, коэффициентом затухания, декрементом и др. Последние могут быть определены из экспериментальных результатов, и по зависимостям, полученным для определенных конструкций, может быть оценен их ресурс остаточной прочности. Рассмотрим один из возможных путей решения этой задачи.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ

Возрастание нарушенности пород приводит с одной стороны, к снижению предела прочности, а с другой стороны – к снижению добротности системы «анкерная крепь-массив горных пород». Поэтому, измеряя добротность среды можно оценить и ее прочностные свойства.

Оценка степени поврежденности материала может оцениваться мерой повреждений [12]

$$\psi = \frac{n}{N}, \quad (1)$$

где  $\psi$  – мера повреждений,  $N$ ,  $n$  – общее и разрушившееся количество элементов в объеме  $V$ .  $\psi$  меняется в пределах от 0 до 1.

Приняв, что полное разрушение наступает при разрушении последнего неповрежденного элемента, а также, что прочность пропорциональна количеству неразрушенных элементов, получим для остаточного ресурса прочности  $R$  выражение

$$R = 1 - \psi = 1 - \frac{n}{N} = 1 - \frac{\sigma_d}{\sigma_n}, \quad (2)$$

где  $\sigma_d$ ,  $\sigma_n$  – действующие и предельные значения напряжений. При контроле суммарной акустической эмиссии ее значение на определенной ступени характеризует величину  $n$ , а общее количество при разрушении образца –  $N$ .

Как известно [13], затухание упругих волн в среде при их распространении может быть охарактеризовано декрементом поглощения

$$\theta = 2\pi k_1 v, \quad (3)$$

где  $\theta$  – декремент поглощения,  $v$  – скорость распространения волн,  $k_1$  – частотный коэффициент затухания, представляющий собой коэффициент пропорциональности между круговой частотой  $\omega$  и коэффициентом затухания в линейной зависимости  $\alpha(\omega) = k_1 \omega$ . В свою очередь декремент поглощения позволяет рассчитать добротность  $Q$

$$Q = \pi/\theta = \pi/(2k_1 v). \quad (4)$$

Другим методом определения добротности среды в образцах или небольших объемах горных пород является регистрация отклика среды или конструкции на ударное воздействие или изменяющийся по частоте гармонический сигнал и определение декремента затухания и добротности. Такая методика была принята, например, в [14], где степень нарушенности гипса при его нагревании оценивалась по параметрам отклика на удар металлическим шариком. Форма такого отклика на удар имеет вид затухающего по экспоненте гармонического сигнала с периодом повторения  $T_n$  и коэффициентом затухания  $\alpha$ . Логарифмический декремент колебания  $\theta$  в этом случае равен  $\theta = \alpha T_n$  [15], а добротность  $Q = \pi/\theta = \pi/(\alpha T_n)$ .

Эти свойства могут быть определены и при гармоническом воздействии на объект контроля, что в данной статье отдельно не рассматривается.

Если путем механического нагружения или нагревания конструкция или образец материала доведены до определенной степени деструкции, но еще сохраняют остаточную прочность, то она может быть определена при механическом нагружении, а вместе с пределом прочности определяется и соответствующий

ресурс остаточной прочности. Это дает возможность определить зависимость  $R(Q)$  между добротностью  $Q$  и ресурсом  $R$  остаточной прочности. Измеряя добротность, можно оценивать и ресурс остаточной прочности.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проиллюстрируем методику вывода зависимости  $R(Q)$  на примере установления в лабораторных условиях экспериментальной связи между добротностью и пределом прочности на одноосное сжатие образцов диаметром 40 и высотой 80 мм из песчано-цементной смеси. Для определения коэффициента затухания совместно с ними испытывались также образцы диаметром 40 и высотой 40 мм, что позволило определять амплитуды ультразвуковых волн на разных базах.

Цель экспериментов – на конкретном примере показать связь механической добротности материала  $Q$  с ресурсом остаточной прочности  $R$  и возможность по первой величине оценивать вторую.

Для этого проведены исследования изменений добротности при внесении поврежденности в образцы путем нагревания до различных температур и соответствующих измерений предела прочности при одноосном сжатии. При каждом виде воздействия осуществлялась одновременная регистрация суммарной акустической эмиссии. Всего испытано 5 образцов, на которых получены схожие результаты.

Для внесения нарушенности образец в трубчатой печи нагревается от температуры окружающей среды 28 °С до температур 150, 200, 300, 450, 600, 750 °С. Нагревание проводится на установке, описанной в [16]. Установка содержала нагревательную трубчатую печь типа Nabertherm RT 50/250/11 с контроллером типа Р 320. Печь позволяла производить нагрев образцов до 1100 °С с заданной скоростью. В нагревательную трубу, ось которой ориентирована вертикально, помещался образец испытываемого материала, к которому через волноводы длиной 280 мм из кварцевого стекла подсоединялись преобразователи акустической эмиссии (АЭ). С торцов нагревательная труба закрывалась

заглушками. Температура в печи задавалась контроллером. Для прижатия друг к другу преобразователей АЭ, волноводов и образца горной породы использовался груз, устанавливаемый на верхнем преобразователе. Все параметры регистрировались с помощью акустоэмиссионной системы A-Line 32D (ООО «Интерюнис», г. Москва). Система регистрировала сигналы АЭ в полосе 30-500 кГц, оцифровывала их с частотой дискретизации 2 МГц и записывала в виде файлов сами сигналы, а также их параметры, на диск компьютера. Преобразователи температуры были подключены к двум параметрическим каналам системы, позволяющим вести запись показаний с частотой дискретизации 5 Гц.

Механическое нагружение образцов осуществлялось на универсальной испытательной машине INSTRON 300DX серии SATEC. Для одновременной регистрации суммарной акустической эмиссии использовалась описанная выше система A-Line 32D.

Для измерения скоростей продольной и поперечной упругих акустических волн использовался прибор «Ультразвук», выпускаемый фирмой «Экогеоспром», г. Тверь.

В ходе испытаний один и тот же образец нагревался многократно от комнатной температуры 28 °С до возрастающих температур из ряда: 150, 200, 300, 450, 600, 750 °С. Кроме того до этих температур нагревались и образцы-дублиеры, на одном из которых совместно с образцом СО-2 измерялось затухание, а на других производилось определение остаточной прочности. Каждый цикл нагрева сопровождался регистрацией суммарной акустической эмиссии  $N_{\Sigma}$ , и при построении графиков эта величина, зарегистрированная на определенном цикле, суммировалась с общим значением, полученным на всех предыдущих. Эта зависимость характеризует степень поврежденности образца – чем больше ее значение, тем больше и поврежденность. В данном случае величина  $N_{\Sigma}$  носила вспомогательный характер. Кроме того, измерялись скорости продольных и поперечных волн на разных базах прозвучивания, что позволило определить динамический модуль упругости, коэффициенты затухания и частоты заполнения ультразвукового сигнала на приемной стороне. По этим величинам

рассчитывались частотный коэффициент затухания  $k_1$ , декремент поглощения  $\theta$  и добротность  $Q$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рисунках 1-4 представлены экспериментальные и рассчитанные зависимости, полученные на образце СО-2 при исследовании свойств образцов с нарушениями, вызванными нагреванием.

На рисунке 1 показаны графики зависимостей скоростей продольных и поперечных волн, изменяющихся при температурном воздействии.

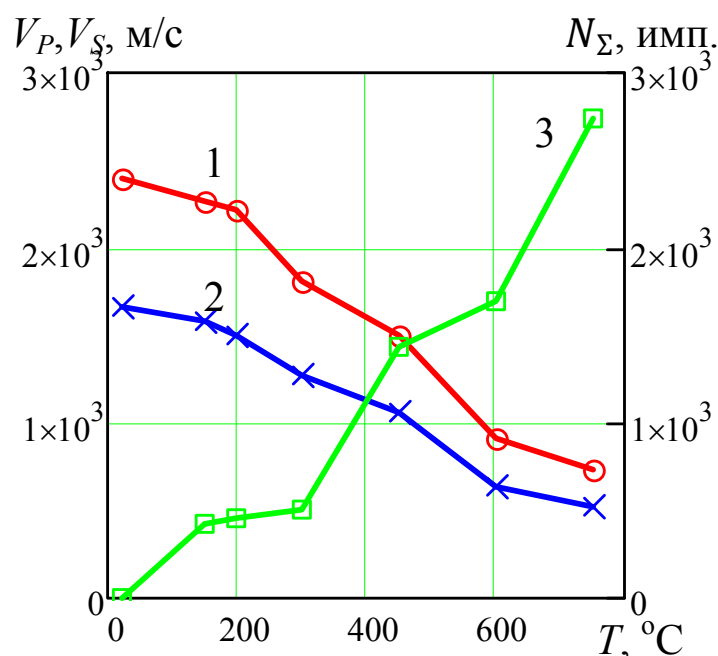


Рис. 1. Графики зависимостей продольной  $V_P$  (1), поперечной  $V_S$  (2) скоростей ультразвуковых волн и суммарной акустической эмиссии  $N_\Sigma$  (3) экспериментального образца от температуры, до которой он был нагрет

Как и следовало ожидать, с увеличением воздействующей температуры эти скорости уменьшаются.  $N_\Sigma$  с каждым циклом нагрева возрастает.

На рисунке 2 представлена зависимость динамического модуля упругости  $E$  от воздействовавшей температуры, рассчитанная по данным рис. 1. В указанном выше диапазоне температур  $E$  падает от 15,4 до 1,46 ГПа, т. е. более, чем в 10 раз. Уменьшение  $E$  и является одной из причин падения скоростей упругих волн. Для соответствия с рисунком 1 здесь также представлен график зависимости  $N_{\Sigma}(T)$ .

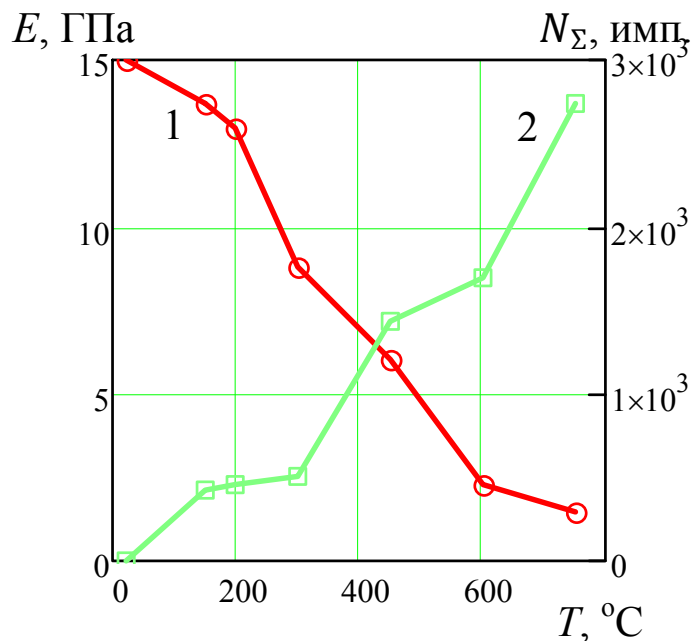


Рис. 2. Графики зависимостей динамического модуля упругости  $E$  (1) и суммарной акустической эмиссии  $N_{\Sigma}$  (2) экспериментального образца от температуры, до которой он был нагрет

Эти графики дают общую характеристику степени деструкции материала, однако для рассматриваемой темы больший интерес представляет анализ его затуханий и добротности.

На рисунке 3 изображена зависимость коэффициента затухания продольной волны  $\alpha_p$  и частоты  $f$ , на которой оно измерялось. Величина затухания, как было отмечено выше, измерялась после соответствующего температурного воздействия на двух образцах разной высоты – 80 и 40 мм. Частота заполнения принятого ультразвукового импульса измерялась по периоду в начальной фазе сигнала.



После температурных воздействий 600 и 750 °С затухание возросло так сильно, что выделение этой фазы на фоне собственных шумов аппаратуры составляло большую трудность. И все же общая тенденция здесь проявляется отчетливо: коэффициент затухания с увеличением нарушенности возрастает, а частота заполнения падает.

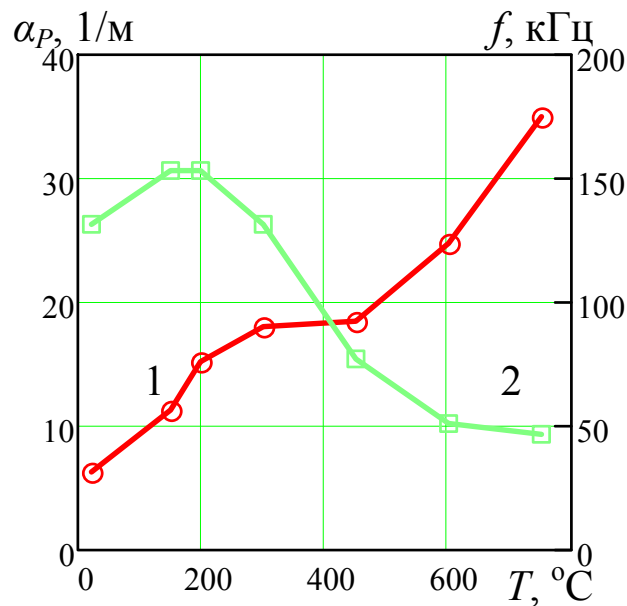


Рис. 3. Графики зависимостей коэффициента затухания  $\alpha_p$  (1) и частоты заполнения  $f$  ультразвукового сигнала (2) экспериментального образца от температуры его нагревания

Несколько меньшие значения частоты при комнатной температуре (первая точка на кривой 2 рис. 3) могут быть обусловлены взаимодействием волн различных типов в первой фазе и большим значением периода заполнения в принятом импульсе по сравнению с последующими его значениями при возросших значениях температур нагревания.

Расчеты по формулам (1) и (2) позволили получить зависимости частотного коэффициента затухания  $k_1$  и добротности  $Q$  от температуры  $T$ , до которой был нагрет образец. Эти зависимости представлены на рисунке 4. Эти графики дают представление о характере изменения указанных свойств.

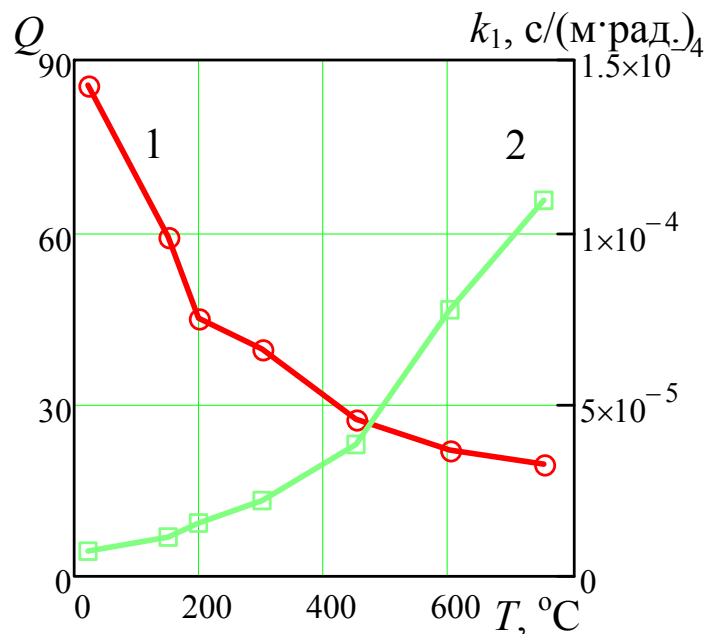


Рис. 4. Графики зависимостей добротности  $Q$  (1) и частотно-го коэффициента затухания  $k_1$  (2) экспериментально-го образца от температуры его нагревания

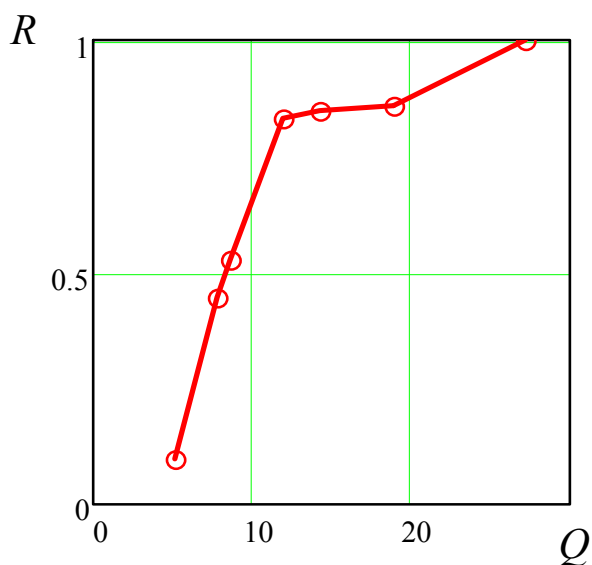


Рис. 5. График зависимости остаточного ресурса прочности  $R$  экспериментального образца от механической добротности  $Q$

Кроме указанных испытаний образца СО-2 проводилось также нагревание аналогичных образцов до перечисленных тем-

ператур и последующее определение предела прочности  $\sigma_{\text{п}}$  при одноосном сжатии.

Образцы отбирались из группы таким образом, чтобы в исходном состоянии скорости продольных волн не отличались в них более чем на 5-7 %.

При температуре 750 °С величина ресурса остаточной прочности  $R$  определялась путем нагрузки образца СО-2 до разрушения после всех циклов нагревания. Эти данные позволили получить зависимости  $\sigma_{\text{п}}(T)$  предела прочности, а также  $R(T)$  остаточного ресурса прочности от температуры  $T$  нагревания образца.

Зависимость в виде графика, приведенная на рисунке 5, является конечной целью экспериментальной части данного исследования. Она показывает принципиальную возможность определения для данной конструкции остаточного ресурса прочности по величине добротности, определяемой из натурального эксперимента.

#### **4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ, ВЫВОДЫ И НАПРАВЛЕНИЕ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В лабораторном эксперименте для внесения повреждений в материал использовалось нагревание. В реальных объектах повреждения возникают во времени при действии нагрузки. Для определения остаточного ресурса прочности анкерного крепления можно воспользоваться двумя путями.

Первый путь – лабораторно-натурных измерений. При этом в лабораторных условиях на образцах определяется добротность  $Q$  ненарушенных горных пород, а также связь ресурса остаточной прочности  $R$  и  $Q$ . По этой зависимости через  $Q$  рассчитывается  $R$ .

При втором пути для практической реализации этого метода можно рекомендовать статистический подход. Добротность определяется на анкерах, установленных в различных местах кровли, а затем, с учетом, что в большинстве мест анкерное крепление достаточно прочное, ищутся анкера со значениями добротности, выскакивающими из общей массы. По добротности производится оценка ресурса  $R$  с учетом, что нулевой ресурс остаточной прочности соответствует нулевой добротности.

Проблема заключается в том, что, как следует из графика на рисунке 5, зависимость между добротностью и ресурсом остаточной прочности носит нелинейный характер, и такая аппроксимация может иметь значительные погрешности. Поэтому в качестве направлений дальнейших работ может быть рекомендовано следующее.

1. Анализ типов горных пород, встречающихся в кровлях подземных выработок наиболее типичных месторождений.

2. Определение на образцах горных пород, встречающихся в кровлях выработок, значений акустической добротности в ненарушенном состоянии.

3. Определение на образцах горных пород зависимостей  $R(Q)$  и, по возможности, проверки путем сопоставления с натурными результатами на основе статистического материала.

4. Установление на лабораторных моделях анкерного крепления зависимостей и закономерностей, характеризующих влияние степени поврежденности на прочностные свойства и добротность.

5. Установление влияния свойств закрепления анкера на величину добротности и ресурс остаточной прочности анкерного крепления.

6. Разработку алгоритмов измерений, обработки показаний и критериев принятия решений для устройств оперативного неразрушающего контроля, которые позволили бы оценивать состояние анкерного крепления и кровли непосредственно в выработках в ходе инспекции.

Еще одной проблемой, которая должна быть решена для успешной диагностики, является установление места пониженных значений добротности. Это может быть либо массив пород, либо соединение анкера с массивом в замке. Для сталеполимерной крепи это цементирующая смола и переходы анкер-смола и смола-массив пород.

Современное состояние приборной базы позволит реализовать указанные алгоритмы в виде мобильного устройства, позволяющего производить контроль анкерного крепления непосредственно в выработках.

## СПИСОК ССЫЛОК

1. Приспособление ПА-1 для испытания крепей анкерных на выдерживание. ТУ 34-23-11038-86. Дата введения в действие 01.07.1986. 15 с.
2. Wittenberg D. Anwendung der Ultraschallmesstechnik an eingebauten Gebirgsankern. Sonderdruck aus Glueckauf, 2001, 137 № 6, S. 320—324.
3. Низкочастотный УЗ дефектоскоп А1220 АНКЕР. Сайт фирмы «Акустические контрольные системы»: [Электронный документ]. (<http://acsys.ru/>). Проверено 07.08.2013.
4. Способ контроля сцепления анкерной крепи с массивом горных пород и устройство для его осуществления. Пат. РФ № 2443867. МПК E21D20/00, G01N29/04.
5. Вознесенский Е. А., Шнарский И. В. Выявление дефектного анкерного крепления кровли на Новомосковском месторождении гипса методами неразрушающего спектрального акустического контроля. Физическая акустика. Нелинейная акустика. Распространение и дифракция волн. Акустоэлектроника. Геоакустика. Сборник трудов Научной конференции «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества». Т. 1. — С. 316—320.
6. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. — М. : Машиностроение, 1984. — 312 с.
7. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. — М. : Стройиздат, 1978. — 239 с.
8. Винников В. А., Кириченко И. В., Шкуратник В. Л. О возможности использования модели Холла-Петча для описания взаимосвязи термоакустической эмиссии с прочностными свойствами и размерами структурных элементов геоматериала // Горн. инф.-анал. бюл. 2010, № 12. — С. 46—50.
9. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / Мин-во геол. СССР; Всесоюз. науч.-исслед. ин-т гидрогеол. и инж. геол.; Под ред. Н. Н. Горяйнова. — М. : Недра, 1992. — 264 с.
10. Савинов В. Н. Комплексная оценка механических и физических характеристик низкопористых пород Карельского масси-

- ва // Геол., геофиз. и разраб. нефт. и газ. месторожд. 2009, № 11. — С. 71—73.
11. Keshavarz M, Pellet F, L., Loret V. Damage and changes in mechanical properties of a gabbro thermally loaded up to 1000°C // Pure and Applied Geophysics, 2010, 167(12). — Pp. 1511—1523.
  12. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. — М. : Машиностроение, 1990. — 448 с.
  13. Боганик Г. Н., Гурвич И. И. Сейсморазведка : Учебник для вузов. Тверь: Издательство АИС, 2006. — 744 с.
  14. Фурса Т. В., Найден Е. П., Осипов К. В., Усманов Р. У. Особенности механоэлектрических преобразований в диэлектрических материалах в области структурных фазовых превращений // Журнал технической физики, 2004, том 74, вып. 12. — С. 52—55.
  15. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний: Учебник для вузов. — М. :Высшая школа, 1980. — 408 с.
  16. Вознесенский А. С., Шкуратник В. Л., Вильямов С. В., Винников В. А. Установка для акустоэмиссионных исследований горных пород при их нагревании // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2007. — № 12. — С. 143—150.