

УДК 622.831

Д.А. Нарышкин, В.А. Вознесенский

**ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ
ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД С АКУСТИКО-
ЭМИССИОННЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ**

Рассмотрены различные структуры информационно-измерительных систем, применяемых для регистрации данных при испытаниях образцов горных пород в лабораторных условиях, показана целесообразность построения таких систем на платформе одного персонального компьютера. Предложена структура измерительной системы с перекрестным управлением данными между отдельными измерительными каналами.

Ключевые слова: принципы построения, акусто-эмиссионные, измерительные системы, испытания, образцы, горные породы.

Семинар № 3

Лабораторные испытания образцов горных пород являются сегодня одними из основных источников численных данных, используемых при расчетах и проектировании подземных и наземных сооружений, создаваемых в условиях, как благоприятных, так и неблагоприятных для их строительства. Основными видами таких испытаний являются определение пределов прочности σ_1 при одноосном сжатии ($\sigma_3 = 0$), при объемном сжатии ($\sigma_3 > 0$), при одноосном растяжении, при сдвиге со сжатием, а также определение деформационных характеристик, таких, как модуль деформаций E_d , модуль упругости E_y , коэффициент поперечных деформаций v , коэффициент Пуассона μ . Кроме того, определяются напряжения σ^∞ и деформации ε^∞ , соответствующие пределу длительной прочности. Эти величины определяются при максимальном значении объемной деформации ε_v , соответствующем максимальному уплот-

нению горной породы. По значениям предела прочности при одноосном и объемном сжатии строится паспорт прочности, представляющий собой на ограниченном участке зависимость, выражаемую известным выражением $\tau = C_0 + \operatorname{tg} \varphi_0 \cdot \sigma$, где τ , σ - предел прочности на сдвиг и сжатие, C_0 - сцепление (предельное сопротивление срезу) при отсутствии нормальных напряжений, φ_0 - угол внутреннего трения.

Такие испытания предусматривают нагружение образца горных пород и регистрацию ряда информативных параметров, характеризующих его напряженно-деформированное состояние. По полученным данным рассчитываются и строятся графики зависимостей измеряемых величин от времени или от других параметров. При этом интерес часто представляют не только величины, измеряемые непосредственно в ходе испытаний (прямые измерения), но и определяемые косвенным путем, т. е. не основе нескольких первичных параметров.

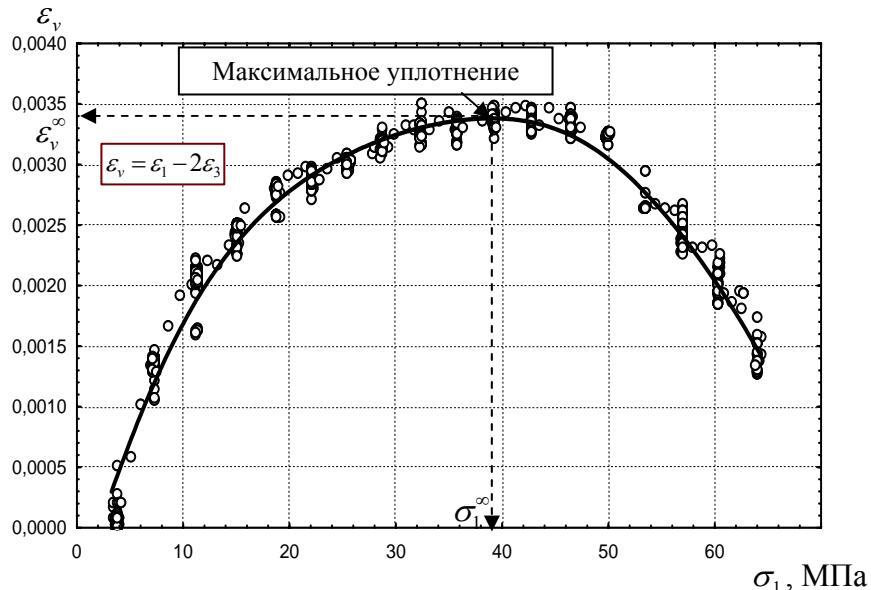


Рис. 1. Зависимость объемной деформации ε_v от осевого напряжения образца σ_1 , а также напряжения σ_1^∞ и деформации ε_v^∞ на пределе длительной прочности

1. Требования к системам и варианты их построения

Современные информационно-измерительные системы позволяют производить сложные операции и определять необходимые параметры с помощью различных математических вычислений и преобразований. Так, например, на рис. 1 представлен график зависимости объемной деформации ε_v от осевого напряжения образца σ_1 , построенный путем усреднения экспериментальных точек, а также напряжения σ_1^∞ и деформации ε_v^∞ на пределе длительной прочности. Результаты получены для образца угля Восточного Донбасса. При этом объемная деформация ε_v вычисляется через продольные ε_l и поперечные ε_3 деформации образца. Построение такого графика и определение пара-

метров прочности производится с использованием трех величин (осевые напряжения, продольная и поперечная относительные деформации), каждая из которых измеряется с определенными ошибками. Суммарная погрешность величин, определяемых косвенным образом, может быть значительно больше, чем каждая из исходных. Уменьшить их, можно, применяя более совершенные технические средства измерения.

Однако, существуют погрешности, которые не могут быть уменьшены даже при применении самых совершенных измерительных средств. Такие погрешности связаны с особенностью изучаемых объектов – горных пород. Их причиной являются:

- неоднородность строения пород;
- слоистость;
- анизотропия;

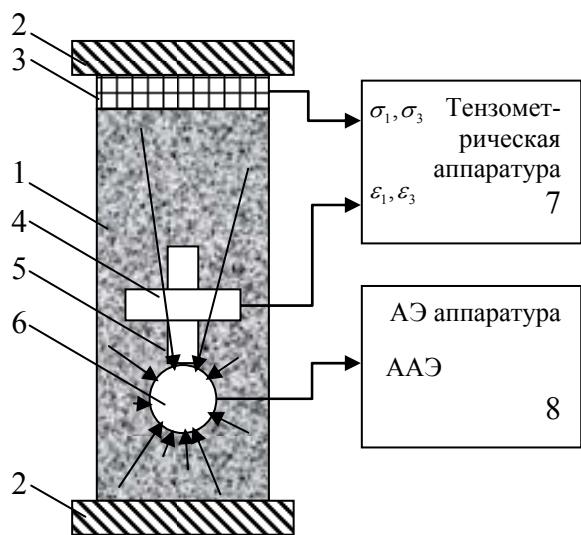


Рис. 2. Схематическое изображение многоканальной системы, осуществляющей регистрацию как механических, так и акустоэмиссионных параметров (пояснения в тексте): 1 – образец горной породы, 2 – пластины пресса, 3 – преобразователь давления на образец, 4, 5 – преобразователи поперечных и продольных деформаций соответственно, 6 – преобразователь акустической эмиссии, 7 – тензометрическая аппаратура, 8 – аппаратура акустической эмиссии (АЭ), регистрирующая, в частности активность акустической эмиссии (ААЭ)

- неравномерность распределения напряжений по объему образца при нагружении;
- дефекты структуры (трещины, пустоты, блочность);
- локальные возмущения при деформировании.

Например, опоры преобразователей перемещения могут оказаться в месте локальных сколов в образце, что внесет существенные искажения в измерения. Кроме того, здесь могут присутствовать также и другие источники, связанные с химическими, физическими и биологическими процессами при деформировании.

Повышение сложности возводимых объектов, увеличение этажности зданий, вызывающее возрастание нагрузок на фундаменты, предъявляют особые требования к точности расчетов и к точности результатов испытаний, закладываемых в них. Снижение погрешностей можно достичь увеличением количества измеряемых параметров, что с информационной точки зрения представляет собой увеличение количества получаемой информации. Но здесь есть и физические предпосылки. Целесообразно применение таких методов, которые позволяют осуществить регистрацию показаний из всего объема образца и таким образом осуществлять оценку по усредненным данным, повышая тем самым точность измерений.

К ним относится метод акустической эмиссии (АЭ), одна из возможных схем

реализации которого представлена на рис. 2. Стрелками отражен тот факт, что преобразователь 6 воспринимает информацию из значительного объема, отражая процессы не в локальных точках, а в образце в целом. Особенностью такой системы является раздельная, не синхронизированная регистрация механических и акустоэмиссионных параметров.

Такие системы применяются достаточно давно. Они строятся, как правило, на основе отдельных измерительных систем, изначально не предназначенных для работы друг с другом, поскольку аппаратура для ре-

гистрации показаний при испытании образцов горных пород не применяется в массовых количествах, и такие системы разрабатываются и изготавливаются в единичных экземплярах. Сопоставление между собой различных измеряемых параметров осуществляется путем их совмещения во времени. Однако такое совмещение часто оказывалось затруднительным, в особенности, когда отдельные регистрирующие системы работают каждая со своим компьютером, на которых производится регистрация показаний. Это приводит к погрешности, резко снижающей эффективность таких систем.

Поэтому одним из основных требований является синхронизация записи показаний во времени, что затруднительно при регистрации на нескольких компьютерах. Другое требование – оптимизация (минимизация) стоимости и сложности. Эти причины обуславливают разрабатывать такие системы, которые позволили бы осуществлять необходимую регистрацию на одном компьютере.

При упрощенной регистрации акустоэмиссионных параметров, таких, как, например, только широко используемая ААЭ \dot{N}_Σ или скорость счета \dot{N} , решение такой задачи возможно относительно простыми средствами.

Примером может служить система «Прочность», разработанная совместно МГГУ и ООО «Подземгазпром» [1, 2]. Она объединяла в себе две отдельные измерительные системы – для деформационных измерений СИИТ-2 и акустоэмиссионную систему АФ-15 (АРГУС-7). Даже с использованием относительно медленного компьютера «Электроника-60», применяемого для задания режимов, опроса датчиков и регистрации показаний, эта система позволяла помимо деформаций реги-

стрировать ААЭ в диапазоне от 0 до 800-1000 имп./с, что вполне достаточно для испытания образцов горных пород.

При расширенном количестве измеряемых акустоэмиссионных параметров, что характерно для современных информационно-измерительных систем, приборы для регистрации АЭ уже достаточно сложные и специализированные, с параллельной обработкой сигнальными процессорами в каналах АЭ. Они, как правило, с точки зрения своей структуры, замкнутые. Поэтому подключение дополнительных четырех-восьми каналов, необходимых для механических измерений при испытании образцов пород, как правило, затруднительно, либо требует значительных затрат по переделке программного обеспечения.

В этом случае как один из вариантов рассматривается установка дополнительных измерительных модулей в тот же самый компьютер и запуск параллельно работающего программного обеспечения. Такой принцип построения системы возможен в системах с разделением времени, тем более что для деформационных измерений преобразователи деформаций и нагрузок достаточно опрашивать относительно редко – не чаще, чем 1 раз в секунду.

Функциональная схема такой системы приведена на рис. 3. Ее отличие от предыдущей системы, изображенной на рис. 2, в том, что АЭ-подсистема и подсистема измерения механических параметров (тензоканалы) размещены в одном блоке персонального компьютера.

При испытаниях образцов пород на одном компьютере одновременно запускаются две программы – одна для регистрации параметров и полных сигналов АЭ и вторая – для регистрации механических параметров.

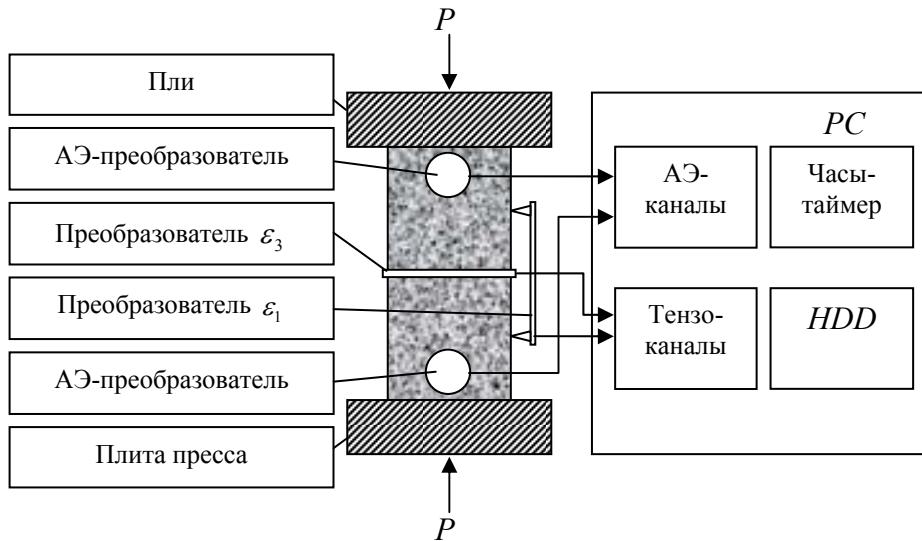


Рис. 3. Схема информационно-измерительной системы с размещением подсистем АЭ и тензоканалов в одном блоке персонального компьютера

Для синхронизации начало измерений второй программы инициируется первой записью данных АЭ. Кроме того, показания времени, записываемые в файлы обеих систем, берутся из системного времени компьютера, что обуславливает высокую точность синхронизации. Даже при сбое часов относительно абсолютного времени, текущее время эксперимента, отсчитываемое от его начала, остается неизменным для обеих подсистем.

Такое построение информационно-измерительной системы дает возможность производить комплексные оценки параметров горных пород и снижать погрешности измерений.

2. Примеры определения свойств горных пород по совместным деформационным и акустоэмиссионным измерениям

Рассмотрим в качестве примера определение напряжений и деформаций на пределе длительной прочности, которые отчитываются в точ-

ке деформационной кривой, соответствующей состоянию максимального уплотнения. На рис. 4 представлены зависимости, характеризующие суть оценки состояния образца породы по результатам измерения ААЭ. При увеличении нагрузки в образце будут присутствовать два процесса возникновения акустической эмиссии, один из которых связан с осевыми деформациями, а другой – с поперечными. Регистрируемая АЭ будет определяться суммой этих двух процессов. В процессе увеличения нагрузки составляющая ААЭ, связанная с осевым деформированием, будет уменьшаться, поскольку основные источники возникновения АЭ здесь это закрытие и перемещение берегов существовавших ранее трещин. ААЭ, связанная с поперечными деформациями, будет возрастать, поскольку поперечные деформации формируются, в основном, вновь образующимися трещинами, число которых с увеличением нагрузки будет также возрастать. ААЭ,

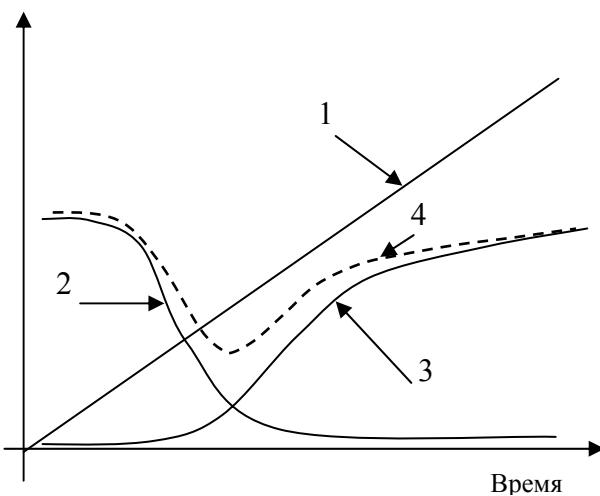


Рис. 4. Обобщенные зависимости изменения от времени: осевой нагрузки или деформации 1; ААЭ, определяемой продольной 2 и поперечной 3 деформациями; кривая ААЭ, характеризующая суммарное действие обоих видов деформации 4

регистрируемая в образце, равна сумме этих двух составляющих. В зависимости от их соотношения, в процессе испытания может наблюдаться минимум, который соответствует состоянию максимального уплотнения горной породы, т. е. максимуму объемной деформации, отмеченному на рис. 1 стрелкой. Поэтому регистрация ААЭ позволяет более точно определить состояние максимального уплотнения и соответствующие ему напряжения и деформации.

Аналогичный результат может быть достигнут и при ступенчатом нагружении образца. На рис. 5 показано изменение ААЭ на одной из ступеней нагружения образца угля Восточного Донбасса. На каждой ступени ААЭ аппроксимируется зависимостью

$$\dot{N}_{\Sigma} = a_0 + a_1 \exp\left(\frac{-t}{a_2}\right),$$

где параметр a_2 характеризует время затухания ААЭ до установившегося уровня и определяется состоянием горной породы, при этом коэффициент детерминации $R^2=66,6\%$. При состоянии максимального уплотнения величина a_2 достигает минимума, как это показано на рис. 6. При этом ступени нагружения, на которой достигается состояние максимального уплотнения, различны.

При определении по объемным деформациям это десятая ступень, а по коэффициенту a_2 – девятая. Погрешность определения напряжений на пределе длительной прочности составляет 10%, что в некоторых случаях

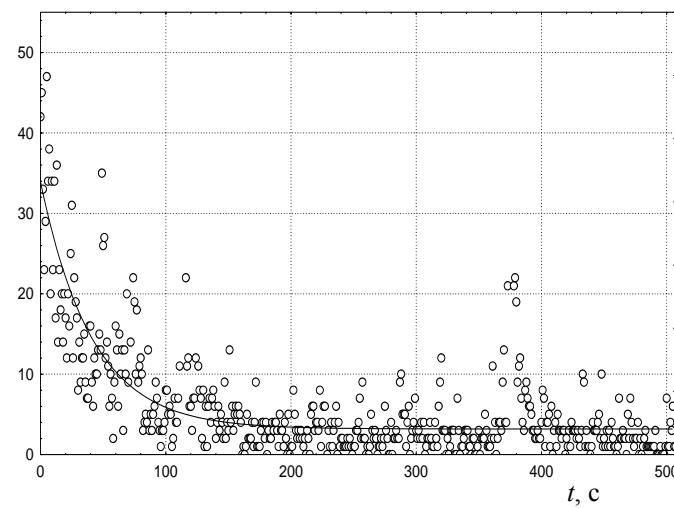
может оказаться существенным.

В данном примере удается определить состояние максимального уплотнения только по ААЭ. Однако не всегда это бывает возможным.

На рис. 7 представлены зависимости ААЭ и объемной деформации от времени при деформировании образца угля Восточного Донбасса.

Если ориентироваться только на график ААЭ, то ее увеличение в моменты $t = 300$ с и в промежутке $t = 450...500$ с может быть принято как начало выхода из состояния максимального уплотнения, по которому определяются напряжения и деформации на пределе длительной прочности, хотя это увеличение связано с локальным образованием трещин в объеме образца и не может быть взято в рассмотрение.

\dot{N}_{Σ} , имп./ с



a_2 , с

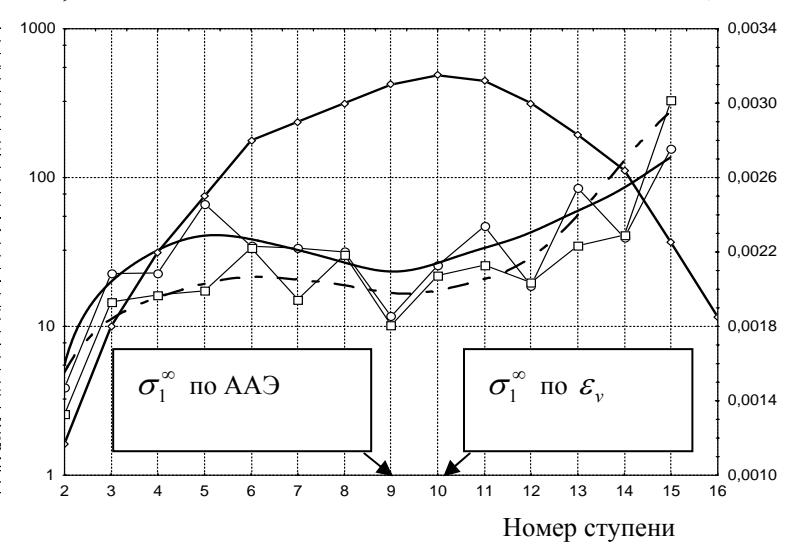


Рис. 5 Зависимость ААЭ от времени на одной из ступеней нагружения

Рис. 6 Зависимость времени затухания (коэффициент a_2) ААЭ от номера ступени нагружения

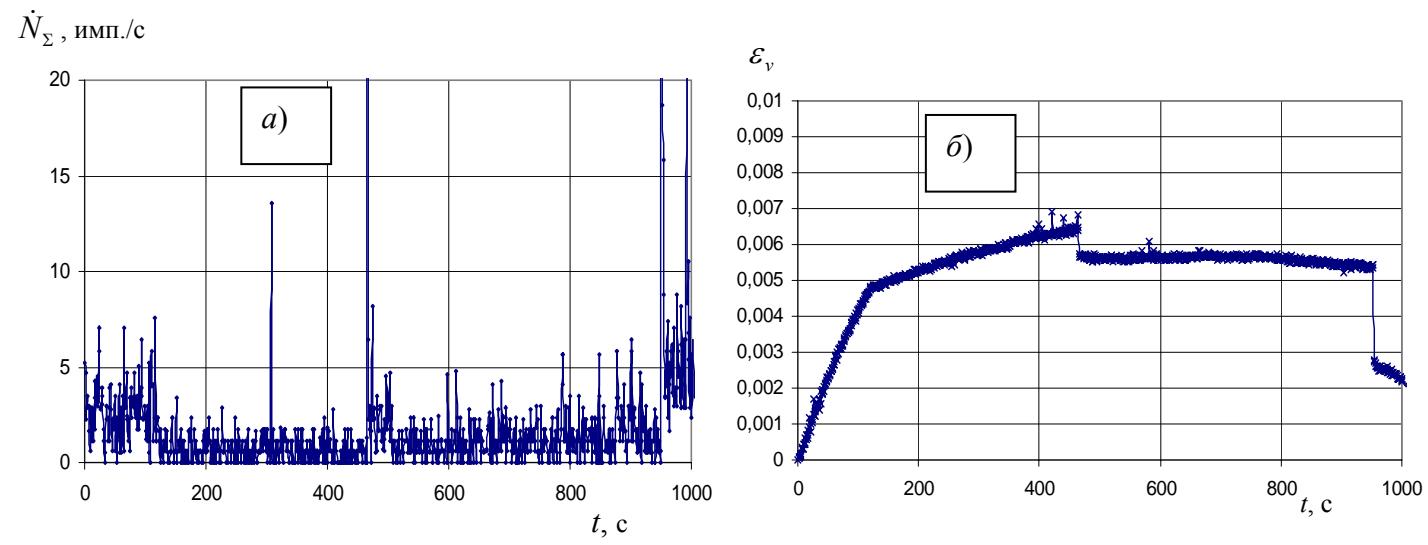


Рис. 7. Изменение ААЭ (а) и объемной деформации (б) при деформировании образца угля Восточного Донбасса

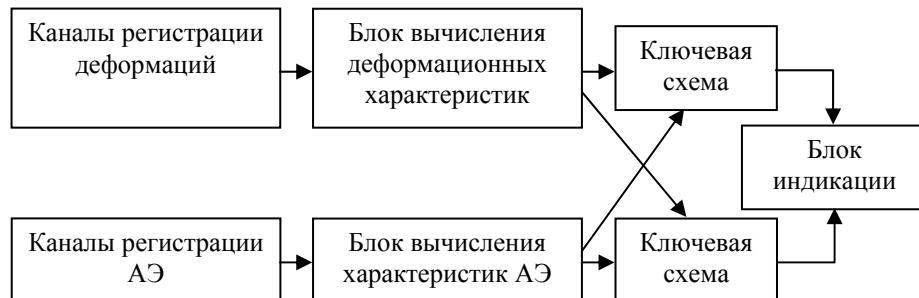


Рис. 8. Схема алгоритма определения параметров горных пород во время совместных АЭ и деформационных измерений

Кроме того для одних типов пород более точные результаты дают деформационные, а для других – акустоэмиссионные измерения.

Поэтому может быть предложен алгоритм работы системы, представленный на рис. 8. В этой схеме результаты деформационных измерений управляют результатами акустоэмиссионных и наоборот. Построение измерительных систем по такому принципу может дать существенное повышение точности определения параметров горных пород.

Выводы

1. Проанализированы различные структуры информационно-измерительных систем, применяемых для регистрации данных при испытаниях образцов горных пород в лабораторных условиях, показана целесообразность построения таких систем на платформе одного персонального компьютера.

2. Предложена структура измерительной системы с перекрестным управлением данными между отдельными измерительными каналами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 06-05-08020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустическая эмиссия в каменной соли на стадиях затухающей и установившейся ползучести / А. С. Вознесенский, Е. С. Окセンкруг, М. Н. Тавостин, В. А. Вознесенский и др. // Труды 5 сессии РАО «Проблемы геоакустики. Методы и средства». Отв. ред. В. С. Ямщиков. М.: 1996, с. 177-180.
2. Вознесенский А.С., Тавостин М.Н. Акустическая эмиссия угля в состоянии за предельного деформирования // ФТПРПИ, 2005, №4, с. 3-10. ГИАБ

Коротко об авторах –

Нарышкин Д.А. – аспирант кафедры «Физико-технический контроль процессов горного производства», e-mail: ftkp@mail.ru, Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia,
Вознесенский В.А. – Российской научный центр «Курчатовский институт», ведущий инженер, e-mail: voovic@smtp.ru;