

**А.С. Вознесенский, Д.А. Нарышкин, М.Н. Тавостин**  
**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ**  
**ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**  
**НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ**  
**ГОРНЫХ ПОРОД**

*Рассмотрены деформационные и акустоэмиссионные характеристики образцов горных пород: каменной соли, антрацита и метаморфизованного габбро-амфиболита – при их деформировании. Показано, что при переходе от стадии допредельного к стадии запредельного деформирования коэффициент корреляции параметров акустической эмиссии, зарегистрированной в различных пространственных областях, уменьшает свое значение, что может служить ранним диагностическим признаком разрушения материала.*

*Ключевые слова: пространственно-временной, коэффициент корреляции, акустическая эмиссия, горная порода, генетический, стадия деформирования.*

**Семинар № 3**

**П**рогнозирование разрушения и определение стадий деформирования горных пород является актуальной научной задачей. Особое место в этом вопросе занимает метод акустической эмиссии (АЭ). В настоящее время встает вопрос о расширении возможностей этого метода для повышения достоверности определения напряженно-деформированного состояния горных пород. Одним из направлений совершенствования этого метода является использование пространственно-временных связей параметров акустической эмиссии, регистрируемой в разных пространственных зонах. Это направление основано на концепции кинетической теории прочности, которая описывается двухстадийной моделью разрушения. Эта модель на первой стадии рассматривает накопление трещин равномерно по всему объему твердого тела. На второй стадии: при достижении определенной величины отношения расстояния между трещинами к их размеру (теоре-

тически около трех, на практике 10-12) происходит кластеризация образующихся трещин, то есть их группировка в локализованных областях – кластерах. После этого начинают разрушаться перемычки между кластерами с образованием трещин большего размера, и разрушение переходит на новый иерархический уровень.

На первой стадии процессы накопления трещин в разных пространственных зонах одинаковы, и коэффициент корреляции между параметрами АЭ, зарегистрированной в таких зонах, будет близок к единице. При переходе к кластеризации трещин на второй стадии изменения АЭ в разных пространственных зонах будет носить противоположный характер, что приводит к уменьшению коэффициента корреляции или к отрицательным его значениям. Регистрация АЭ в разных пространственных зонах позволит установить момент перехода от объемного накопления трещин к их кластеризации и тем самым прогнозировать разрушение горных пород.

## 1. Лабораторная установка для исследований и образцы пород

Для исследований указанных закономерностей была использована установка для нагружения, в состав которой входят лабораторный пресс EU-100 с максимальной нагрузкой 100 т, стабилометр (камера всестороннего сжатия) БВ-21, обеспечивающий плавность хода при нагружении и разгрузке образцов. Деформации и нагрузки на образец регистрируются компьютеризированной измерительной системой на базе акустоэmissionной аппаратуры A-Line 32D («Интерюнис») с установленным дополнительно блоком тензометрических каналов. Измерительная система позволяет регистрировать следующие информативные параметры нагружения:

- осевые нагрузки и напряжения  $\sigma_1$ ;
- боковые напряжения  $\sigma_2 = \sigma_3$ ;
- продольные деформации  $\epsilon_1$ ;
- поперечные деформации  $\epsilon_2$ .

Отличие используемой измерительной системы в том, что АЭ-подсистема и подсистема измерения механических параметров (тензочаналы) размещены в одном блоке персонального компьютера.

Особенности данной системы и ее применения описаны в [1], а особенности методики измерений в [2].

Информационно-измерительная система дает возможность производить комплексные оценки параметров горных пород. Частота опроса датчиков деформирования и динамометра один раз в секунду. Программа для обработки АЭ производит запись сигнала в базу данных при превышении амплитудой сигнала некоторого порогового значения, задаваемого исследователем, при этом частота опроса составляет 5 МГц, а запись длится 1 мсек. Сигналы с датчиков де-

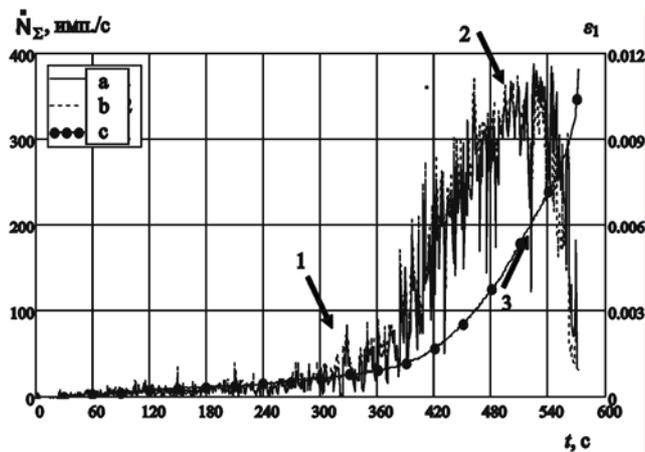
формирования и АЭ поступают на блок АЦП и записываются в память компьютера.

В данной работе рассматривается установление пространственно-временных корреляционных зависимостей параметров АЭ для трех типов пород: каменной соли, антрацита, обладающими пластичностью и ползучестью и габбро-амфиболитов, относящихся к классу скальных горных пород.

Образцы каменной соли были выбраны с месторождения «Тулская площадь» из скважины 6п. Образцы изготовлены в форме цилиндров диаметром  $60 \pm 1$  мм и высотой  $120 \pm 2$  мм.

Образцы антрацита получены из залежей Восточного Донбасса (Гуково). Глубина разработки 1100 м. Из этих кусков были получены образцы цилиндрической формы диаметром  $40 \pm 2$  мм и высотой  $80 \pm 2$  мм.

Образцы скальных горных пород были отобраны из места будущего строительства высотного здания. Участок работ расположен в пределах вытянутого в субмеридиональном направлении массива габбро, габбро-амфиболитов среднего-позднего девона (D1-3) сложной морфологии, вблизи его восточного контакта с нижнесилурийскими метаморфизованными эффузивно-осадочными породами (S1), представленными эффузивами основного-среднего и кислого состава, их туфами, углисто-глинисто-кремнистыми сланцами с прослоями зеленых сланцев, амфиболитов и известняков, с мелкими телами дунитов, гарцбургитов и серпентинитов. Для проведения испытаний образцы скальных пород подготавливались в форме цилиндров диаметром  $40 \pm 1$  мм и высотой  $80 \pm 2$  мм. Отбор и подготовка образцов осуществлялись по ГОСТ 21153.0-75 [3]. Упругие харак-



**Рис. 1. Графики изменения ААЭ  $\dot{N}_\Sigma$  (а, б) по двум каналам и продольных деформаций  $\varepsilon_1$  (с) образца в зависимости от времени**

теристики образцов определялись путем совместного измерения деформаций и АЭ, как это описано в [4].

В данной работе рассматривается установление пространственно-временных корреляционных зависимостей параметров АЭ и на их основе определение момента перехода образцов горных пород в стадию запрядельного деформирования при возрастающей нагрузке. Эксперименты проведены на описанных выше трех типах пород различных генетических групп.

## 2. Результаты испытаний образцов каменной соли

Испытание образцов каменной соли проводилось при линейном увеличении осевой нагрузки от 0 МПа до 16 МПа в течении 560 с. Результаты испытаний представлены на рис. 1, где изображены графики изменения продольной деформации  $\varepsilon_1$  и активности АЭ (ААЭ)  $\dot{N}_\Sigma$ , от времени.

При линейном увеличении нагрузки продольная деформация развивается неравномерно. На участке времени от 0 с до 350 с, продольные деформации нарастают с меньшей скоростью, чем после 350 с. Здесь наблюдается их резкое возрастание, и при  $t = 555$  с нагрузка была сброшена

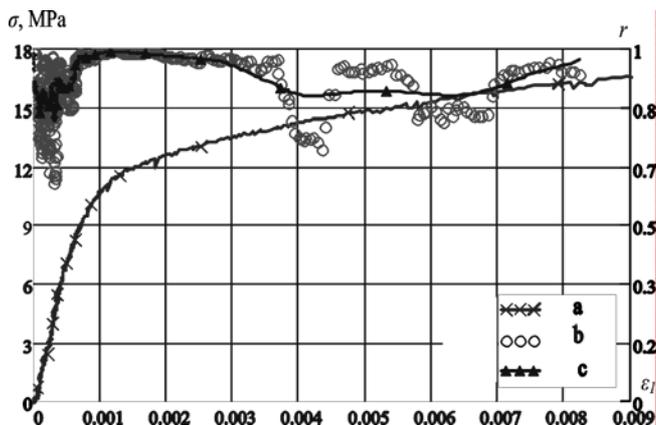
оператором, чтобы не повредить испытательную установку при разрушении образца.

Кривые ААЭ, зарегистрированные по двум каналам, демонстрируют схожий характер изменения

во времени. От начала нагружения до момента времени  $t = 300$  с уровень ААЭ не превышает величины 20-30 имп./с. После этого момента происходит постепенное увеличение общего уровня до максимума, наблюдаемого на 500-й секунде. При этом ААЭ достигает величины около 380 имп./с. Затем наблюдается снижение ААЭ вплоть до момента сброса нагрузки.

Сравнивая кривые ААЭ, зарегистрированной по обоим каналам, можно отметить их схожее поведение. Так, например, на участке 300 – 320 с, отмеченном на рис. 2 стрелкой и цифрой 1, наблюдается сначала увеличение, затем уменьшение и после этого увеличение ААЭ, как по первому, так и по второму каналам. Схожий характер изменения отчетливо наблюдается также и на участке 500 – 510 с, этот участок отмечен стрелкой и цифрой 2. В тоже время на участке, отмеченном стрелкой и цифрой 3, увеличению ААЭ по одному каналу соответствует ее уменьшение по другому каналу и наоборот.

Количественная оценка схожести или различия направлений изменения ААЭ по двум каналам может быть произведена с помощью коэффици-



**Рис. 2.** Графики изменения осевого напряжения  $\sigma$  (a), коэффициентов корреляции  $r$  ААЭ (b) со сглаживающей кривой (c) в зависимости от продольной деформации  $\varepsilon_1$

ента корреляции, вычисляемого в скользящем временном окне заданной ширины. При этом расчеты производятся по следующему алгоритму:

1. Задаются шириной временного окна из следующих соображений. В нашем случае отсчеты АЭ, деформаций и нагрузок берутся с интервалом 1 с. Для получения статистически достоверного результата объем выборки при вычислении коэффициента корреляции следует брать не менее 30 элементов. Однако при ограниченном объеме данных эксперимента это число желательно уменьшать до тех пор, пока результат вычислений не потеряет свою стабильность, т.е. результаты вычислений в близких окнах будут иметь значительный разброс. Объем выборки следует брать минимально возможным для того, чтобы не потерять в результате чрезмерного сглаживания отдельные короткие события, связанные с образованием сравнительно крупных одиночных трещин. В результате многочисленных вычислений с различной шириной окна было установлено, что уменьшение выборки, т.е. ширины окна, до 20 элементов не влияет на получаемый результат.

2. Выбирают первую точку для сглаживания при  $t = 0$  с и конечную

точку, определяемую шириной временного окна.

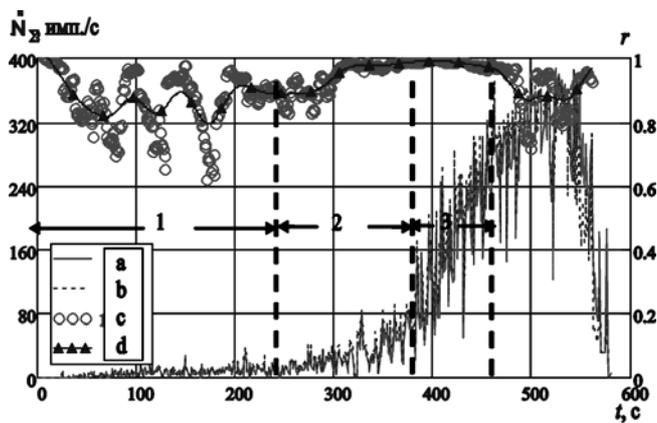
3. В указанном окне для каждой секунды выбирают пары значений ААЭ, регистрируемой по первому и второму каналу.

4. Для указанных пар значений вычисляют величины среднеквадратического отклонения ААЭ по каждому каналу; в случае равенства нулю хотя бы одной из них, переходят к пункту 6. Такая проверка необходима в особенности при обработке результатов испытаний образцов скальных пород, для которых характерны участки отсутствия АЭ, на которых вычисление коэффициента корреляции дает сообщение об ошибке и математически некорректно.

5. Для указанных пар значений ААЭ вычисляют коэффициент корреляции и присваивают его значение средней точке временного интервала.

6. Если последняя точка временного окна не выходит за пределы всей выборки, сдвигают окно на одну точку вправо и переходят к пункту 3, т.е. вычисляют коэффициент корреляции для следующего положения временного окна.

Результаты расчетов по указанному алгоритму приведены на рис. 2 и 3, на первом из которых изображены графики изменения нагрузки ( $\sigma$ ), коэффициента корреляции ( $r$ ) ААЭ по двум каналам, а также кривой «с», сглаживающей эти значения в зависимости от продольной деформации



**Рис. 3.** Графики изменений ААЭ  $\dot{N}_\Sigma$  (а, б) по двум каналам, коэффициентов корреляции  $r$  ААЭ (с) со сглаживающей кривой (д) в зависимости от времени

( $\varepsilon_1$ ). На втором рисунке представлены графики ААЭ, коэффициентов корреляции со сглаживающей кривой «д» в зависимости от времени.

На этих графиках можно отметить 3 характерные зоны.

1. Зона 1 упругого деформирования образца проявляет себя при  $\varepsilon_1$  от 0 до 0,001. Здесь происходит закрытие макротрещин и пор в образце, существовавших ранее, что сопровождается очаговым возникновением АЭ и значениями коэффициента корреляции  $r$  в диапазоне от 0,6 до 0,97. График изменения нагрузки от деформаций имеет большой наклон по сравнению с последующими стадиями. Колебания  $r$ , наблюдаемые в первой зоне, могут быть связаны с невысокими значениями ААЭ при недостаточных для закрытия трещин и пор нагрузках в образце каменной соли. Закрытие трещин и пор происходит в наиболее ослабленных участках образца соли.

2. Зона 2 упруго-пластического деформирования образца наблюдается при  $\varepsilon_1$  от 0,001 до 0,0038. Здесь коэффициент корреляции ААЭ по двум каналам близок к 1. На этом участке макротрещины уже закрыты и происходит образование новых микротрещин по всему объему образца,

что сопровождается увеличением ААЭ.

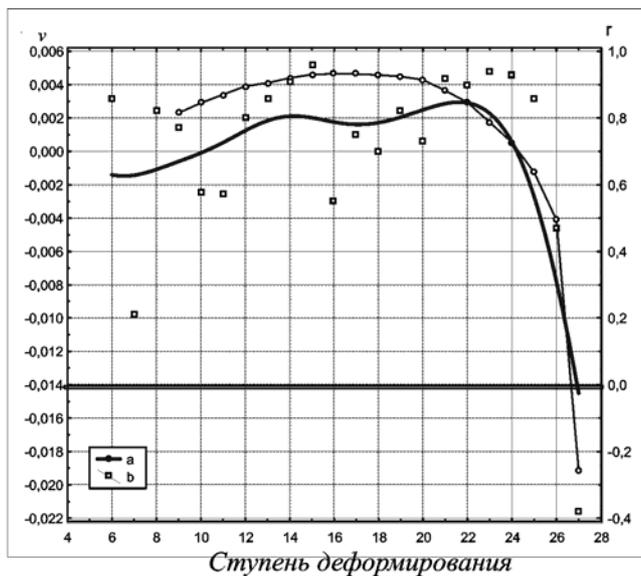
3. Зона 3 предразрушения образца выявляется при  $\varepsilon_1$  от 0,0038 до 0,008, здесь коэффициент корреляции ААЭ по двум каналам снижается по сравнению с предыдущей стадией и изменяется в пределах от 0,7 до 0,95. Эта стадия соответствует очаговому накоплению трещин, при котором источники АЭ группируются то в одном, то в другом месте образца. В этой зоне наблюдаются максимальные значения ААЭ и происходит снижение коэффициента корреляции ААЭ по двум каналам, этот участок соответствует резкому увеличению поперечных деформаций.

При значениях  $\varepsilon_1 > 0,009$  ААЭ резко уменьшается, а при  $\varepsilon_1 = 0,01$  происходит разрушение образца.

Таким образом, коэффициент корреляции ААЭ, зарегистрированной по двум каналам, области чувствительности которых в образце разделены друг от друга, может характеризовать стадии нагружения образца. В допредельной области деформирования коэффициент корреляции близок к 1, уменьшение этой величины характеризует состояние предразрушения и переход к запредельному деформированию.

### 3. Результаты испытания образцов угля

В качестве примера рассмотрим результаты испытания одного из об-



**Рис. 4.** График изменения объемного деформирования  $\varepsilon_v$  (a) и коэффициентов корреляции ААЭ  $r$ , рассчитанные по всем значениям на каждой ступени (b) в зависимости от номера ступени  $N$  при ступенчатом нагружении образца

разцов антрацита из залежей Восточного Донбасса (Гуково). Испытания проводились при наличии бокового давления по схеме нагружения Кармана (увеличивается  $\sigma_1$ ;  $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const} > 0$ ) при ступенчатом увеличении нагрузки.

Значения коэффициента корреляции ААЭ по двум каналам вычислялись в пределах ступени нагружения. При этом было замечено, что отрицательные величины коэффициента корреляции встречаются только на последней, 27 ступени. На остальных ступенях его значения положительные (рис. 4).

Это говорит о том, что нагрузка на всех ступенях кроме последней не перераспределяется между отдельными областями, и образец работает как единое целое. На последней ступени наблюдается локализация областей разрушения и перемещение этих областей по объему образца.

В то же время в пределах одной ступени нагружения также может происходить изменение знака коэффициента корреляции, вызванное различием процессов деформирования

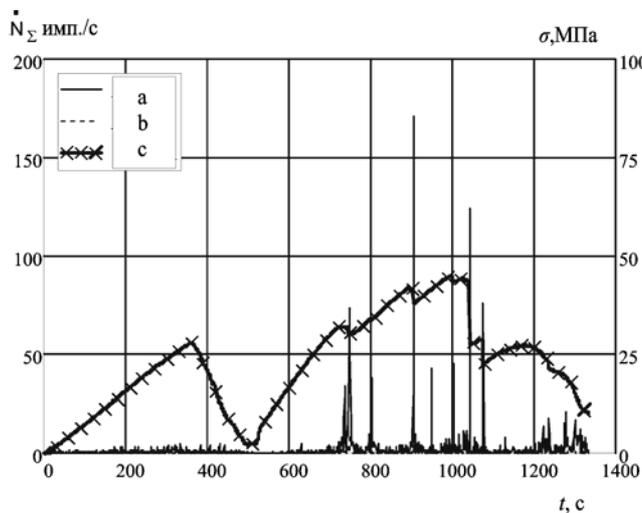
и разрушения материала в разных пространственных областях. В данном случае расчет коэффициента корреляции производился скользящим окном в 20 элементов ААЭ по двум каналам.

На ступенях меньшей нагрузки с номерами меньше 25 участки отрицательного коэффициента  $r$  отсутствуют.

Установлено, что стадия запредельного деформирования сопровождается пространственным перемещением области разрушения; это проявляется в неодинаковом изменении активности акустической эмиссии по регистрационным каналам, преобразователи которых установлены – один в верхней, а другой в нижней частях образца породы; указанное явление может быть связано с делением монолитного образца на блоки и работой отдельных блоков, по очереди воспринимающих нагрузку.

Уменьшение коэффициента корреляции ААЭ по двум каналам для антрацита на последней ступени нагружения, где происходили процессы разрушения образца, более значительное, чем для каменной соли. Прогнозным признаком разрушения тут является наличие выхода коэффициента корреляции в отрицательную область.

#### **4. Результаты испытания образцов скальных горных пород**



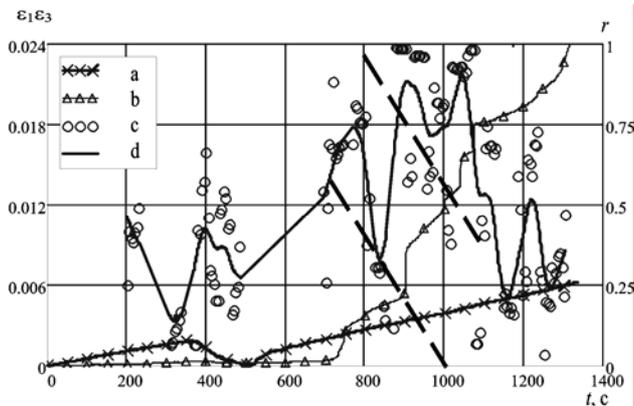
**Рис. 5. Графики изменения ААЭ  $\dot{N}_\Sigma$  (а, б) по двум каналам и напряжения  $\sigma$  (с) в зависимости от времени  $t$**

Как видно из графиков, приведенных на рис. 5, сигналы акустической эмиссии регистрировались в достаточно небольшие промежутки времени вспышками в моменты необратимых деформаций с образованием достаточно крупных трещин.

Как видно из представленного выше графика, ААЭ, регистрируемая по двум каналам, имеет низкие значения (от 0 до 4 имп./с) от начала эксперимента и вплоть до начала разрушения образца на 730 с. С момента 730 с начинается процесс разрушения образца с образованием нескольких крупных трещин. Перед разрушением наблюдаются интервалы с низкими значениями ААЭ, что связано с накоплением механической энергии, достаточной для разрушения связей в наиболее ослабленных участках горной породы. Во временных отрезках, где наблюдаются наибольшие значения ААЭ, происходило образование крупных трещин, что приводило к росту поперечных деформаций образца и сказывалось на показаниях динамометра. Достаточно крупных трещин было несколько, их образование было зафиксировано резким всплеском ААЭ скачками поперечных деформаций и нагрузки на образец. Образование трещин зафиксировано в моменты времени 748 с (73 имп./с), 905 с (171 имп./с), 1002 с (46 имп./с). При  $t = 1023$  с (143 имп./с) зарегистрировано сильное ослабление несущей способности образца. Это объясняется тем, что

В отличие от соляных горных пород, для которых активность АЭ при деформировании имеет достаточно высокие значения, а импульсы АЭ следуют непрерывным потоком, для скальных пород характерно спорадическое, вспышкообразное проявление АЭ. Этим обусловлена трудность прогнозирования стадий деформирования и разрушения горных пород.

Испытание образцов скальных пород проходит в соответствии с [5] и состоит из 3-х основных этапов: нагружение образца под прессом до заданной нагрузки, меньшей предела прочности для данной горной породы, затем разгрузка до минимального значения напряжения и повторное нагружение до разрушения. Результаты испытаний представлены на рис. 5 и 6, где на первом из них изображены графики изменения осевого напряжения  $\sigma$  и ААЭ  $\dot{N}_\Sigma$ , а на втором - значения коэффициентов корреляции  $r$  ААЭ, зарегистрированной по двум каналам, сглаживающая кривая «d», продольная  $\varepsilon_1$  и поперечная  $\varepsilon_3$  деформации в зависимости от времени  $t$ .



**Рис. 6.** График изменения продольной  $\varepsilon_1$  (а) и поперечной  $\varepsilon_3$  (б) деформаций, коэффициентов корреляции ААЭ  $r$  (с) со сглаживающей кривой (д) в зависимости от времени

образец скальной горной породы разрушался на отдельные блоки. В момент ослабления одного из блоков, нагрузка тут же перераспределялась между оставшимися. Следует заметить, что скачки напряжений соответствуют пикам ААЭ. В то же время, зависимости между величинами сброса напряжения и скачков ААЭ не обнаружено.

Количественная оценка схожести или различия направлений изменения ААЭ по двум каналам произведена с помощью коэффициента корреляции, вычисляемого в скользящем временном окне заданной ширины. При этом расчеты производятся по алгоритму, описанному выше.

Результаты расчетов изображены на рис. 6, где представлены графики зависимостей от времени продольной  $\varepsilon_1$ , поперечной  $\varepsilon_3$  деформаций образца, коэффициентов корреляции  $r$  ААЭ по двум каналам при циклическом нагружении образца. При отсутствии АЭ коэффициент корреляции не рассчитывался.

При испытании нагрузка вначале увеличивалась, затем сбрасывалась, а затем опять увеличивалась вплоть до разрушения образца. Как следует из рис. 6, между 500-й и 700-й секундами АЭ отсутствует, что может быть

объяснено эффектами памяти предыдущих нагрузок горной породы. Начиная со значения времени около 700 секунд, наблюдается резкий рост поперечных деформаций, сопровождающийся появлением АЭ, это дает возможность вычислять коэффициент корреляции с окном в 20 значений. На участках от 900 до 1050 с наблюдаются высокие значения коэффициента корреляции. После этого происходит уменьшение их более чем в 2,5-3 раза. Границы его изменения показаны на рис. 5 пунктирными линиями. При времени около 1350 с образец разрушился. В данном случае уменьшение коэффициента корреляции можно рассматривать как прогнозный признак разрушения образца.

В тоже время, сравнение с результатами, полученными на образце каменной соли и антрацита, позволяет сделать вывод о том, что из-за вспыскообразного характера ААЭ для скальных пород коэффициент корреляции имеет больший разброс, однако закономерность его уменьшения при приближении к предельным напряжениям в целом сохраняется.

### **Выводы**

Для каменной соли коэффициент корреляции ААЭ, зарегистрированной по двум каналам, области чувствительности которых в образце разделены друг от друга, может характеризовать стадии нагружения образца. В допредельной области деформиро-

вания коэффициент корреляции близок к 1, уменьшение этой величины характеризует состояние предразрушения и переход к запредельному деформированию.

Уменьшение коэффициента корреляции ААЭ по двум каналам для антрацита на последней ступени нагружения, где происходят процессы разрушения образца, более значительное, чем для каменной соли. Прогнозным признаком разрушения

тут является выход коэффициента корреляции в отрицательную область.

Из-за вспышкообразного характера АЭ для метаморфизованных габбро-амфиболитов коэффициент корреляции ААЭ имеет больший разброс, чем для представленных выше типов горных пород, однако закономерность его уменьшения при приближении к предельным напряжениям в целом сохраняется.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухаметшин А.М., Санфиоров И.А., Вознесенский А.С., Нарышкин Д.А. и др. Под ред. Мухаметшина А.М. и Санфиорова И.А.. Комплексные инженерно-геофизические и инженерно-геологические исследования на площадке строительства особо ответственных объектов (на примере многоэтажных зданий) делового центра Екатеринбург-Сити – Екатеринбург: Полиграфист, 2008.

2. Тавостин М.Н., Нарышкин Д.А. Повышение точности измерений деформационных характеристик горных пород в камерах всестороннего сжатия // Горный ин-

формационно-аналитический бюллетень. 2008, № 6, стр. 112-116.

3. ГОСТ 21153.0-75. Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам испытаний. М.: Изд-во стандартов. 1975

4. Способ определения коэффициента Пуассона материала. Патент РФ № 2 361 188, МПК G01N 3/08. Оpubл. 10.07.2009, Бюл. №19.

5. ГОСТ 28985-91 Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. М.: Изд-во стандартов. 1991. **ИДБ**

#### Коротко об авторах

*Вознесенский А.С.* – доктор технических наук, профессор кафедры «Физико-технический контроль процессов горного производства», e-mail: al49@mail.ru;

*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, ud@msmu.ru

*Тавостин М.Н.* – ООО «Подземгазпром», кандидат технических наук, зав. лабораторией изучения механических свойств горных пород отдела «Геомеханика», e-mail: ftkp@mail.ru;

