УДК 622.02:539.2

С.В.КУЧУРИН
Московский государственный горный университет

ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ОБРАЗЦАХ УГЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ МЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Приведены результаты экспериментов по исследованию закономерностей акустической эмиссии образцов антрацита при одноосных испытаниях с заданными скоростями нагружения и продольной деформации и при трехосном деформировании по схеме Кармана в условиях различных уровней бокового давления. Путем сопоставления графиков зависимостей акустоэмиссионных и деформационных характеристик выявлены возможности оценки физико-механических свойств угля, идентификации стадий деформирования и границ между указанными стадиями по информативным параметрам эмиссии. Установлено наличие особенностей проявления акустоэмиссионных свойств угля в зависимости от исследуемых режимов и схем механического нагружения образцов.

Experimental results of research into regularities of acoustic emission (AE) in anthracite samples under uniaxial tests with given loading and displacement rates as well as under axisymmetric triaxial compression in conditions of various levels of lateral pressure are given. Possibilities to estimate physical and mechanical properties of coal and identification of deformation stages and borders between the specified stages basing on informative AE parameters are revealed by comparing diagrams of AE dependences and deformation characteristics. Presence of peculiarities in AE properties of coal depending on research modes and schemes of mechanical loading of the samples is established.

Первые попытки изучения акустической эмиссии (АЭ) при механическом нагружении образцов угля были предприняты в России в 50-х годах прошлого столетия [1, 2]. Однако в дальнейшем они не получили широкого развития [3]. Подавляющее большинство проводившихся во всем мире исследований было сосредоточено на изучении сейсмоакустической эмиссии угольных пластов для прогнозирования геодинамических явлений. При этом АЭ образцов угля изучалась преимущественно в звуковом и нижнем ультразвуковом диапазоне частот, что не позволяло исследовать эволюцию тонкой структуры геоматериала в процессе его деформирования.

Объектом исследования в настоящей работе являлся антрацит пласта $i_3^н$ «Степановский» бывшей шахты «Западная» (г.Новошахтинск Ростовской обл.). Механические испытания проводились на цилиндрических образцах высотой 100 мм и диаметром 50 мм, которые выбуривались из монолитных блоков, отобранных с глубины около 700 м.

Для проведения экспериментов по одноосным [4] и трехосным [5] испытаниям образцов угля использовался стабилометр БВ-21 конструкции ВНИМИ, который устанавливался между плитами испытательной машины EU-100 (Германия).

Герметизация образцов угля для исключения проникновения масла из рабочей камеры стабилометра производилась путем помещения их в тонкую резиновую оболочку. Одноосное сжатие осуществлялось в двух различных режимах: при постоянной скорости нагружения ($\dot{\sigma}_1 = \text{const}$) и при постоянной скорости продольной деформации ($\dot{\varepsilon}_1 = \text{const}$). Трехосное сжатие производилось по схеме Кармана ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, где σ_i –

главные напряжения, $i = 1, 2, 3$) с заданной скоростью осевой деформации $\dot{\varepsilon}_1 \approx 10^{-5}$ с$^{-1}$.

Эксперименты по трехосному деформированию осуществлялись при различных уровнях бокового давления: 5, 10 и 15 МПа. Трехосное сжатие образцов антрацита производилось в два этапа: создавалось гидростатическое обжатие $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ и затем сразу же повышалось дифференциальное напряжение $\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_2$ ($\sigma_2 = \sigma_3$ – боковое давление).

В результате были получены полные диаграммы деформирования образцов угля по схеме Кармана при различных значениях σ_2.

Исследования проводились с помощью компьютеризированной измерительной системы, позволявшей вести автоматизированную регистрацию механических и акустоэмиссионных параметров. При этом в экспериментах измерялись величины осевого напряжения σ_1, при трехосном сжатии – значения $\Delta\sigma_1$ и $\sigma_2 = \sigma_3$, продольной ε_1 и поперечной ε_2 деформаций с использованием компьютеризированной тензометрической аппаратуры СИИТ-2. Индикаторы часового типа и упругие кольца для регистрации соответственно продольных и поперечных деформаций, манометр бокового давления и динамометр были оснащены тензорезисторами. Регистрация активности АЭ $\dot{N}$ велась пьезопреобразователем посредством акустико-эмиссионного измерительного комплекса A-Line 32D в полосе частот от 30 до 500 кГц.

По результатам испытаний производился расчет значений объемной деформации $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2$ и суммарной АЭ N_Σ. По данным, полученным в ходе экспериментов, строились различные графические зависимости: $\sigma_1 - \varepsilon_1$, $\varepsilon_v - \sigma_1$, $\dot{N} - \sigma_1$, $\dot{N} - \varepsilon_1$, $N_\Sigma - \varepsilon_1$, $\Delta\sigma_1 - \varepsilon_1$, $\varepsilon_v - \Delta\sigma_1$, $\dot{N} - \Delta\sigma_1$. Совместный анализ акустоэмиссионных и деформационных кривых был использован для идентификации стадий деформирования и границ между этими стадиями, а также для оценки физико-механических свойств угля.

На рис.1 в качестве примера приведены характерные графические зависимости $\sigma_1 - \varepsilon_1$ и $\dot{N} - \varepsilon_1$ для угля при одноосном испытании с $\dot{\varepsilon}_1 = \text{const}$. На рис.1 обозначены следующие стадии деформирования: I – пригрузки, II – упругая, III – упругопластическая, IV – предельного разрушения, V – запредельного разрушения и VI – запредельной дезинтеграции.

Границы между стадиями деформирования обозначены пунктирными линиями и соответствуют определенным характеристикам физико-механических свойств угля. Переход от стадии II к III соответствует достижению предела упругости σ_e, от III к IV – предела длительной прочности σ_1^∞. Границей между стадиями IV и V является предел мгновенной прочности при одноосном сжатии σ_c, между стадиями V и VI – σ_1^∞ в запредельной области деформирования.

В случае одноосного нагружения угля с $\dot{\sigma}_1 = \text{const}$ выделяются четыре допредельные стадии деформирования I-IV. При рассмотрении графиков зависимостей $\varepsilon_v - \sigma_1$ и $\dot{N} - \sigma_1$ граница перехода между стадиями III и IV (σ_1^∞) может быть уточнена по максимуму кривой ε_v, обозначающему переход от уплотнения к началу дилатансии угля.

Стадия деформирования I сопровождается всплеском скорости счета АЭ. В стадии II значения $\dot{N}$ минимальны. Упругопластическая стадия III характеризуется возрастанием активности АЭ. Стадия IV сопровождается величинами $\dot{N}$, близкими к максимальным. В запредельной области за спадом активности АЭ после достижения σ_c, сопровождающим стадию V, происходит ее возрастание до значений, близких к максимальным ($\dot{N}_{\max}$), которые соответствуют σ_1^∞ в данной области. В дальнейшем происходит постепенное уменьшение $\dot{N}$ до (0,3-0,4) $\dot{N}_{\max}$ в процессе окончательной дезинтеграции образцов на стадии VI.

Сравнение графиков зависимостей $N_\Sigma - \varepsilon_1$ и $\sigma_1 - \varepsilon_1$ позволяет идентифицировать некоторые стадии деформирования и пределы прочности угля. Для случая одноосного деформирования угля с $\dot{\varepsilon}_1 = \text{const}$ были выде-

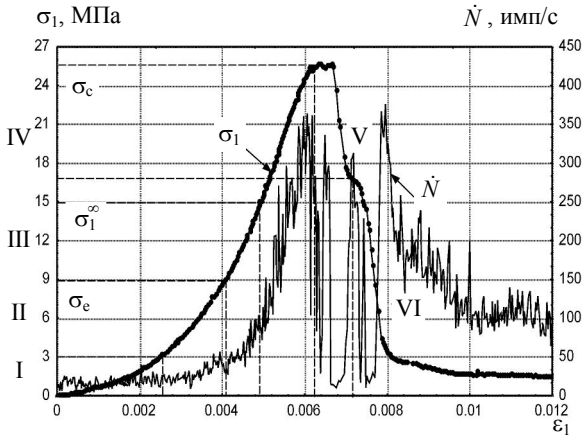


Рис.1. Графики зависимостей $\sigma_1 - \varepsilon_1$ и $\dot{N} - \varepsilon_1$ при одноосном деформировании угля с постоянной скоростью

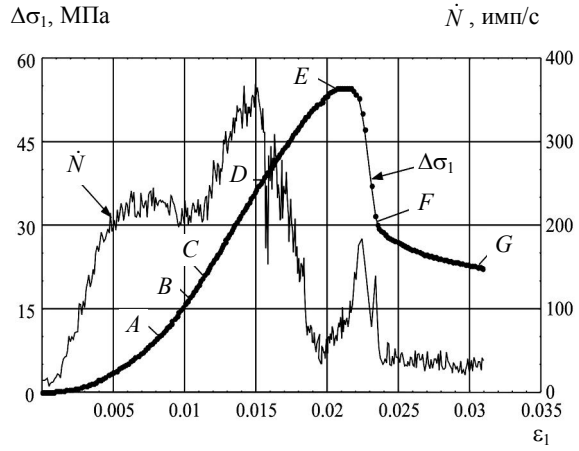


Рис.2. Графики зависимостей $\Delta\sigma_1 - \varepsilon_1$ и $\dot{N} - \varepsilon_1$ для угля при боковом давлении 5 МПа

лены следующие четыре стадии: 1 – упругая, 2 – упругопластическая, 3 – запредельного деформирования и 4 – остаточной прочности. Переходы между стадиями сопровождаются изменением угла наклона графиков $N_\Sigma - \varepsilon_1$, что отражается в появлении перегибов, соответствующих достижению σ_e – границы между 1-й и 2-й стадиями, σ_c – между 2-й и 3-й, предела остаточной прочности σ_0 – между 3-й и 4-й стадиями. В случае нагружения угля с $\dot{\sigma}_1 = \text{const}$ на графиках $N_\Sigma - \varepsilon_1$ выделяются стадии 1 и 2.

На рис.2 показаны типичные графики зависимостей $\Delta\sigma_1 - \varepsilon_1$ и $\dot{N} - \varepsilon_1$ для угля при трехосном деформировании в условиях $\sigma_2 = 5$ МПа. Стадия деформирования $0A$ – пригрузки, AB – упругая, BD – упругопластическая, DE – предельного разрушения, EF – запредельного разрушения и FG – запредельной дезинтеграции. Границы между стадиями и другие характерные точки, определяющие физико-механические свойства угля, далее обозначены так же, как и в случае одноосных испытаний, но с прибавлением Δ, так как рассматриваются в значениях дифференциального напряжения. Граница B соответствует достижению $\Delta\sigma_e$, точка C – достижению $\Delta\sigma_1^\infty$, граница E – $\Delta\sigma_c$ и граница F – $\Delta\sigma_0$.

Из рис.2 видны особенности проявления активности АЭ, соответствующие выделенным стадиям деформирования и границам между ними. Для повышения достоверности определения $\Delta\sigma_1^\infty$ дополнительно используются графики зависимостей $\varepsilon_v - \Delta\sigma_1$ и $\dot{N} - \Delta\sigma_1$. Однако выявление максимума зависимости $\varepsilon_v - \Delta\sigma_1$ не всегда оказывается возможным и он не всегда соответствует $\Delta\sigma_1^\infty$. В то время как наиболее быстрое возрастание активности эмиссии, как параметра, обладающего для угля большей структурной чувствительностью и адекватностью по сравнению с деформационными характеристиками, позволяет однозначно идентифицировать момент достижения $\Delta\sigma_1^\infty$.

В случае деформирования образцов угля по схеме Кармана, как и при одноосных испытаниях с постоянной скоростью продольной деформации, по аномалиям графиков $N_\Sigma - \varepsilon_1$ возможна идентификация указанных выше четырех стадий деформирования. При этом возможно четкое определение момента достижения, по крайней мере, двух границ между тремя начальными стадиями – $\Delta\sigma_e$ и $\Delta\sigma_c$, достижение $\Delta\sigma_0$ не всегда возможно однозначно идентифицировать.

По особенностям проявления активности АЭ, наряду с частными аномалиями АЭ на различных стадиях и границах между ними, были выявлены два типа акустоэмиссионного поведения образцов угля при деформировании. Их общая сущность заключается в следующем. При одноосном де-

формировании с $\dot{\varepsilon}_1 = \text{const}$ и трехосном при высоких значениях σ_2 (15 МПа) основной процесс интенсивного инициирования разрушения протекает в околопредельной и запредельной областях деформирования. В случае же воздействия умеренных боковых давлений (5, 10 МПа) активное накопление поврежденности в образцах протекает в допредельной зоне.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о наличии устойчивых закономерностей в поведении информативных параметров АЭ образцов угля в зависимости от стадий деформирования, режимов и схем механических испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Назарный С.А.* Установление предупредительных признаков внезапных выбросов угля и газа с помощью микросейсмических приборов // Уголь. 1953. № 3. С.32-37.

2. *Константинова А.Г.* Сейсмоакустические наблюдения при разрушении образцов кизеловского угля // Рудничная аэрогазодинамика и безопасность горных работ. М.: Наука, 1964. С.155-162.

3. *Кучурин С.В.* Современное состояние исследований в области акустоэмиссионных процессов при деформировании и разрушении угля (обзор) // Сб. научн. трудов студентов магистратуры МГГУ. Выпуск 5. М.: Изд-во МГГУ, 2005. С.160-167.

4. *Шкуратник В.Л.* Экспериментальные исследования акустической эмиссии в образцах угля при одноосном нагружении / В.Л.Шкуратник, Ю.Л.Филимонов, С.В.Кучурин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2004. № 5. С.42-49.

5. *Шкуратник В.Л.* Закономерности акустической эмиссии в образцах угля при трехосном деформировании / В.Л.Шкуратник, Ю.Л.Филимонов, С.В.Кучурин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2005. № 1. С.53-62.