

УДК 622.620.173:620.173:622.837

Булат А.Ф., академик НАН Украины, д-р техн. наук, профессор,
Скипочка С.И., д-р техн. наук, профессор,
Пилипенко Ю.Н., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Дякун Р.А., канд. техн. наук
 (ИГТМ НАН Украины)

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ БАЗИС СПЕКТРАЛЬНО- АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОГО УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА

Булат А.Ф., академік НАН України, д-р техн. наук, професор,
Скіпочка С. І., д-р техн. наук, професор,
Пилипенко Ю.М., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Дякун Р.А., канд. техн. наук
 (ІГТМ НАН України)

НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ БАЗИС СПЕКТРАЛЬНО- АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ ФЛЮЇДОНАСИЧЕНОГО ВУГЛЕПОРОДНОГО МАСИВУ

Bulat A.F., Acad. NASU, D. Sc. (Tech.), Professor,
Skipochka S.I., D. Sc. (Tech.), Professor,
Pilipenko Yu. N., Ph. D. (Tech.), Senior Researcher,
Dyakun R.A., Ph. D. (Tech.)
 (IGTM NAS of Ukraine)

SCIENTIFIC AND METHODOICAL BASIS FOR SPECTRAL-ACOUSTIC STATE CONTROL OF FLUID-SATURATED COAL MASSIF

Аннотация. Предмет исследований – методология контроля свойств и состояния углеродного массива. Цель работы – теоретико-экспериментальное обоснование акусто-эмиссионного метода контроля массива. Изложены элементы теории акусто-эмиссионного контроля, методика, устройства и результаты экспериментальных исследований предельно-напряженных флюидонасыщенных пород. Приведены способы изучения и интерпретации результатов геофизических наблюдений дезинтеграции флюидонасыщенных геоматериалов в сложном напряженном состоянии, базирующиеся на положениях теории линий скольжения. Описаны подходы к решению задачи о напряженно-деформированном состоянии флюидонасыщенного угольного пласта на основе коэффициентов автокорреляции между протекающими во времени сейсмоакустическими событиями. Дано экспериментальное обоснование методов комплексного контроля с определением уровня дезинтеграции Фурье-оценкой амплитудно-частотных и амплитудно-временных спектров.

Ключевые слова: массив горных пород, флюиды, разрушение, сейсмоакустика, спектр.

В процессе угледобычи в зонах разрывных дислокаций часто происходят газодинамические явления (ГДЯ), особенно это характерно для выемочных столбов, нарушенных малоамплитудной тектоникой и асимметричной пликативной складчатостью. Данная проблема постоянно усугубляется в связи с увеличением газообильности угольных шахт, усложнением горно-геологических условий

и несоответствием возможностей современной высокопроизводительной техники и технологии требованиям геомеханической безопасности при проходческих и очистных работах [1-3].

Определение местоположения и параметров зон разрывных дислокаций выполняется, в основном, методами шахтной сейсморазведки [4, 5]. Другое важнейшее направление в предупреждении ГДЯ – эффективная методика оценки динамики и распределения горного давления. Предлагаемый метод спектрально-акустического контроля состояния флюидонасыщенного углеродного массива, позволяет решить эти задачи в комплексе. Физическая основа метода – процессы перехода энергии разрушения угольных пластов и пород в энергию генерируемой массивом сейсмоакустической эмиссии (САЭ).

Для создания оперативного метода контроля состояния углеродного массива при ведении горных работ в зонах разрывных дислокаций, были разработаны стенд для исследования разрушения флюидонасыщенного геоматериала и методика комплексного спектрально-акустического контроля; установлено изменение параметров САЭ при разрушении флюидонасыщенного угля; исследовано распространение упругих колебаний, генерируемых прорастанием трещин с различной скоростью в неоднородном анизотропном углеродном массиве.

Элементы теории метода. Классические физико-геологические модели флюидонасыщенного угольного пласта с упругим сжатием и сдвигом без проскальзывания, а также с зоной дробления в виде ориентированной трещиноватости представлены на рис. 1. Характеристики модели а) – фиксированная мощность слоя h , наличие двух слоев, имеющих различные модули упругости E_1, E_2 и параметры флюидопроницаемости K_1, K_2 ; модели б) – сдвиг и наличие зоны дробления, представляющей собой заполненные флюидом трещины.

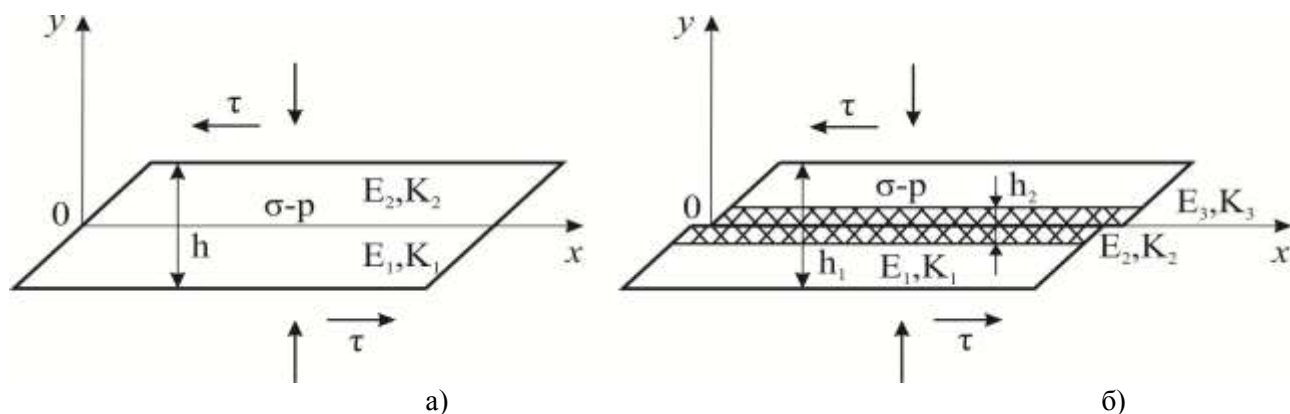


Рисунок 1 – Физико-геологические модели флюидонасыщенной разрывной дислокации с сомкнутыми берегами (а) и наличием зоны дробления (б)

Характер взаимодействия различных типов упругих волн с нарушенным флюидонасыщенным массивом имеет существенные различия, поэтому наиболее перспективно использование (в качестве информативного) спектрального состава акустических колебаний, которые изменяют свои модальные параметры в результате обменных процессов на границах раздела сред.

Углеродный массив – геосреда с иерархически блочным строением, в напряженном состоянии, обусловленными горным давлением и структурной неоднородностью пород. Изменение напряженного состояния вызывает деформации пород, приводит к перестройке контактных поверхностей в системе трещин и появлению новых дефектов, сопровождающихся САЭ. Прочность геосреды зависит от числа и размеров дефектов. Для разрывного напряжения при сдвиге ее можно вычислить, воспользовавшись условием Гриффитса:

$$\sigma_p = \left[\frac{2Gw}{(1-\mu^2)l} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где G – модуль сдвига; w – плотность поверхностной энергии; l – критическая длина трещины; μ – коэффициент Пуассона.

Из экспериментальных данных известно начальное распределение трещин по объему, а количество вновь появившихся дефектов в единицу времени определяется выражением:

$$n_p = N_0 \left[v \exp\left(-\int_0^t v \partial t\right) \right], \quad (2)$$

где N_0 – начальное количество дефектов; v – коэффициент вариации.

Интенсивность САЭ, пропорциональная числу образующихся дефектов, зависит от энергии активации разрывов и от отношения значений действующего и разрывного напряжений. По мере возрастания горного давления сначала появляются крупномасштабные пульсации эмиссии, затем их масштаб уменьшается. В системе «твердый скелет – флюид – газ» в потоке энергии происходят диссипативные потери, вплоть до самых высокочастотных составляющих пульсаций эмиссии. Нижний порог частотного спектра определяется отношением V/l , где V – скорость волны, а верхний вычисляется по формуле:

$$\omega_0 = \frac{V}{\lambda_0} - \frac{V}{l} Re^{3/4} \quad (3)$$

где λ_0 – внутренний масштаб прорастания трещин, характеризующий наиболее высокочастотные составляющие сейсмоакустической эмиссии.

Отмеченный комплекс характеристик сейсмоакустических событий раскрывает один из механизмов генерации колебаний в массиве и является важным диагностическим признаком.

Возмущения в газе удобно характеризовать скалярным, а в твердом теле – скалярным и векторным потенциалами смещений, описываемыми волновыми уравнения, решаемыми методом преобразований Фурье по времени и координатам. С учетом граничных условий на поверхности контакта «газ – упругая среда» и условий излучения получим интегральные выражения для потенциалов. В частности, потенциал смещений в газе можно представить в виде [6]:

$$W(h) = W_s(0) \left[(2k_s^2 - k_t^2) e^{-\sqrt{k_s^2 - k_t^2} h} - 2k_s^2 e^{-\sqrt{k_s^2 - k_t^2} h} \right]^2 k_t^{-4}, \quad (4)$$

где $W_s(0) = \frac{A^2 \omega^3 k_s \sqrt{k_s^2 - k_t^2}}{4 \rho_2 c_t^4 S'_0(k_s)}$ – мощность волны Стонели с амплитудой A , возбуждаемой поверхностным источником; ω – частота колебаний; k_s, k_t – комплексные параметры поглощения в среде; ρ_2 – плотность среды; S'_0 – параметр отражения на границе упругого полупространства; c – коэффициент жесткости.

Аналогичной формулой описывается мощность излучения волны Рэлея при отсутствии газа в упругой среде. Для расчетов сейсмоакустических полей, возникающих в газонасыщенной среде при рассеянии упругих волн во включениях, в случае гармонических источников интегралы Фурье, описывающие потенциалы в упругой среде, могут быть оценены в волновой зоне методом стационарной фазы. Это позволяет проанализировать как поля смещений, так и диаграммы направленности излучения.

Диссипативные потери энергии определяются связью между любыми двумя последовательными полуразмахами амплитуды колебаний (A), например, A_{i-1} или $A_{i-1/2}$, и описываются трансцендентным уравнением:

$$(1 - \eta) e^\eta = (1 + \xi) e^{-\xi}, \quad (5)$$

где $\xi = 2b_c A_{i-1}/a$; $\eta = 2b_1$ – безразмерные полуразмахи колебаний; b_c, b_1 – постоянные для многослойной среды.

В уравнении (5) огибающая кривая свободных затухающих колебаний приближенно описывается дифференциальным уравнением первого порядка

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\omega_0}{2\pi c} \Phi(A), \quad (6)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\tilde{n}/A}$; $\Phi(A)$ – диссипация энергии.

Теоретический базис отображения и интерпретации данных САЭ имеет ряд особенностей. Как правило, источник сейсмоакустических событий определяется с помощью системы геофонов. При этом отношение длин пробега упругих волн до различных геофонов в большинстве случаев оценивают усредненным показателем. Однако при приближении источника к одному из геофонов отношение длин акустических лучей до наиболее удаленных может составлять нескольких десятков и сотен метров, что заметно уменьшает вероятность регистрации ослабленных импульсов. Однообразие группы импульсов обеспечивает правильный расчет разностей времен прихода между первым и каждым последующим фронтом импульса в выбранной группе. В процессе контроля на временной шкале к таким полезным сигналам присоединяются импульсные помехи различного происхождения, что приводит к ошибке в расчетах. Этого можно избежать при интерполяции событий в некотором интервале $\tau = t_2 - t_1$ для выделения аномалий на уровне нормального фона и определения координат собы-

тий. При этом возникают сложности математического характера, поэтому качественную и количественную оценку трещинообразования устанавливают путем решения задачи о восстановлении поверхности, заданной в узлах прямоугольной пространственной решетки. Рассмотрим решение такой задачи.

Пусть для прямоугольной области $\Omega[a,b] \times [c,d]$, где \times - декартово произведение множеств, введена сетка линий $\Delta_{N,M} = \Delta_N^x \times \Delta_M^y$ ($\Delta_N^x : a = x_0 < x_1 < \dots < x_N = b$; $\Delta_M^y : c = y_0 < y_1 < \dots < y_M = d$), которая делит область Ω на прямоугольные ячейки $\Omega_{ij} \{ (x, y) : x \in [x_i, x_{i+1}], y \in [y_j, y_{j+1}] \}$ ($i = 0, 1, \dots, N-1; j = 0, 1, \dots, M-1$). Через $C^{k,l}(\Omega)$, где k, l - натуральные числа, обозначим множество непрерывных Ω функций $f(x, y)$, имеющих непрерывные частные и смешанные производные $f_{(x,y)}^{(v,s)} = \partial^{v+s} f(x, y) / \partial x^v \partial y^s$ ($v \leq k, s \leq l$), где v, s - натуральные числа.

При выборе конкретного алгоритма целесообразнее всего остановится на локальных сплайнах. Их отличительная особенность состоит в том, что при построении сплайнов используется информация о поведении функции не во всей области ее определения Ω , а на некоторой, достаточно малой ее части. Такие сплайны могут учитывать разную гладкость функции на различных участках области Ω . Их, как правило, легче исследовать и удобнее вычислять.

Интерполяционным эрмитовым полиномиальным сплайном степени $2k+1$ по x и $2l+1$ по y для функции $f(x, y) \in C^{k,l}(\Omega)$ называют функцию $S_{2k+1,2l+1}(f; x, y)$, которая на каждом прямоугольнике Ω_{ij} ($i = 0, 1, \dots, N-1; j = 0, 1, \dots, M-1$) имеет вид:

$$S_{2k+1,2l+1}(f; x, y) = \sum_{v=1}^{2k+1} \sum_{\mu=1}^{2l+1} a_{v\mu}^{(i,j)} (x - x_i)^v (y - y_j)^\mu, \quad (7)$$

а числа $a_{v\mu}^{(i,j)}$ определяются из условий $\delta_{2k+1,2l+1}^{(v,s)}(x_{i+p}, y_{j+q}) = f^{(v,s)}(x_{i+p}, y_{j+q})$, ($i = 0, 1, \dots, N-1; j = 0, 1, \dots, M-1; p, q = 0, 1; 0 \leq v \leq k, 0 \leq s \leq l$).

В качестве аппарата приближения функции $f(x, y) \in C^{v-1,l-1}(\Omega)$ используют интерполяционный эрмитовый сплайн четной степени $S_{2v,2l}(f_i, x, y)$, определяемый из следующих условий:

- в каждой ячейке Ω_{ij} ($i = 0, 1, \dots, N-1; j = 0, 1, \dots, M-1$)

$$S_{2v,2l}(f_i, x, y) = \sum_{k=0}^{2v} \sum_{l=0}^{2l} b_{kl}^{(ij)} (x - x_i)^k (y - y_j)^l; \quad (8)$$

- коэффициенты $b_{kl}^{(ij)}$ находятся из соотношений (для $p, q = 0, 1, 2$):

$$S_{2v,2l}^{(v_p, \mu_q)} \left(x_{i+\frac{2p-1}{1+p}}, y_{j+\frac{2q-1}{1+q}} \right) = f_{2v,2l}^{(v_p, \mu_q)} \left(x_{i+\frac{2p-1}{1+p}}, y_{j+\frac{2q-1}{1+q}} \right), \quad (9)$$

Из физических соображений поверхность, которую нужно восстановить, принадлежит классу $C^{1,1}(\Omega)$. Функция $S_{1,1}(f; x, y)$ имеет простую и удобную для вычислений структуру и над произвольной ячейкой $\Omega_{ij} (i = 0, 1, \dots, N - 1; j = 0, 1, \dots, M - 1)$ задается формулой:

$$S_{1,1}(f; x, y) = f(x_i, y_j)(x_{i+1} - x)(y_{j+1} - y)/(h_x^i h_y^j) + f(x_i, y_{j+1})(x_{i+1} - x)(y - y_j)/(h_x^i h_y^j) + f(x_{i+1}, y_j)(x - x_i)(y_{j+1} - y)/(h_x^i h_y^j) + f(x_{i+1}, y_{j+1})(x - x_i)(y - y_j)/(h_x^i h_y^j), \quad (10)$$

где $(x_{i+k}, y_{j+l}) (k, l = 0, 1, \dots, n)$ – координаты вершин элементарного прямоугольника Ω_{ij} ; $f(x_{i+k}, y_{j+l}) (k, l = 0, 1, \dots, n)$ – значения функции f в вершинах элементарного прямоугольника; $\Omega_{ij}; (x, y)$ – текущие координаты произвольной точки, расположенной в элементарном прямоугольнике Ω_{ij} ; $h_x^i = x_{i+1} - x_i$, $h_y^j = y_{j+1} - y_j$ – параметры сторон элементарного прямоугольника Ω_{ij} .

Анализ погрешности приближения произвольной функции $f \in C^{1,1}(\Omega)$ сплайном $S_{1,1}(f; x, y)$ показал, что ее величина находится в прямой зависимости от максимальных шагов $h_x = \max\{h_x^i : 0 \leq i \leq N - 1\}$ и $h_y = \max\{h_y^j : 0 \leq j \leq M - 1\}$ сеток Δ_N^x и Δ_M^y , соответственно, а именно $\max\{|f(x, y) - S_{1,1}(f; x, y)| : (x, y) \in \Omega\} \rightarrow 0$ при одновременном стремлении h_x и h_y к нулю. При необходимости это позволяет определить минимально необходимое число узлов интерполяции (x_i, y_i) функции $f(x, y)$, требуемое для достижения определенной величины погрешности аппроксимации. Очаги трещинообразования связаны с геомеханическими процессами, протекающими в углепородном массиве при ведении горных работ, а приведенные теоретические приемы составляют надежную основу при обработке и интерпретации результатов экспериментальных исследований.

Лабораторные исследования. Исследования разрушения угля и горных пород при различных режимах нагружения и связанной с этим САЭ проводились на стенде (рис. 2), в основе которого пресс ПСУ-500 (или П-50 для слабых пород), система повышения жесткости (рис. 2 а, б), устройства непрерывной регистрации напряжений и деформаций, установка для водогазонасыщения (рис. 2 в) и устройства сейсмоакустического контроля разрушения (рис. 2 г, д).

Нагрузочное устройство состоит из корпуса 1 и штока 2, создающего осевые усилия в образце 3, помещенном в непроницаемую оболочку 4. Уровень бокового подпора создается микрометрическими винтами 5, герметизация рабочей камеры 6 осуществляется прокладками 7. Поршни 8, 9 образуют три камеры: А – аккумулялирующую, Б – контрольную и В – приемную, снабженные образцовыми манометрами. Принцип работы устройства: от насоса высокого давления через дроссель флюид подается в камеру А, через отверстия 10 попадает к образцу 3 и в камеру В. В процессе разрушения геоматериала происходит изменение его проницаемости, что определяется по изменению давления и расходу флюида. В нижней части корпуса находится испытательная камера, в которой

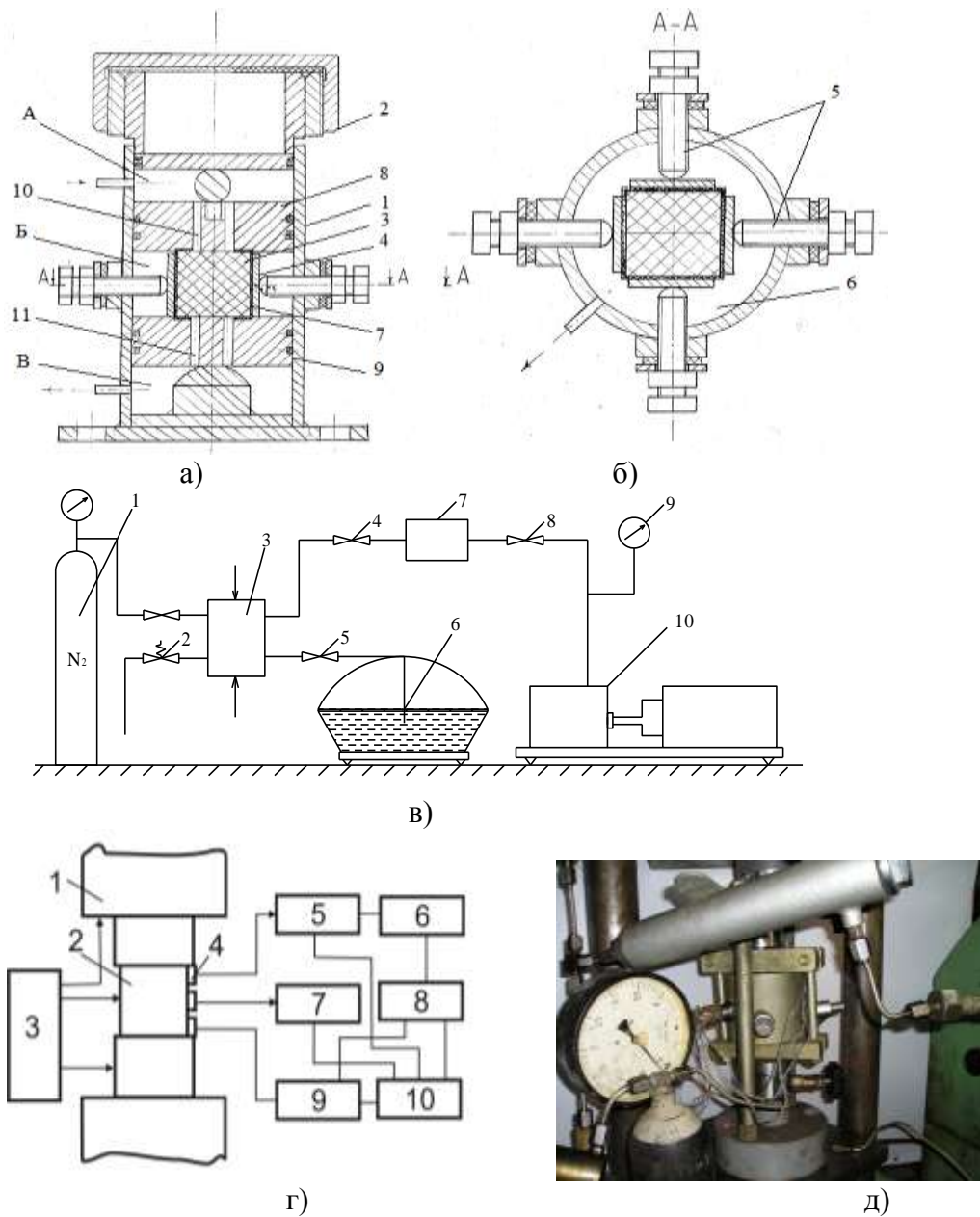


Рисунок 2 – Элементы станда для определения фильтрационных и акусто-эмиссионных свойств геоматериала при нагружении

размещены образец 3, упругие скобы-тензометры для измерения деформаций и электронагревательный элемент. В верхней части корпуса находится вспомогательная камера, предназначенная для поддержания постоянного давления в испытательной камере и для разгрузки штока. При наличии утечек флюид попадает в камеру Б, что регистрирует контрольно-измерительная система.

Основные параметры устройства: объемное осесимметричное сжатие – до 100 МПа; боковой подпор – до 5 МПа; расход жидкости – 0,3-50 см³/мин; размер образцов – 40×40×40 мм; диапазон изменения температур – 19-80 °С; объем аккумулирующей камеры – 0,9 л. Погрешность определения проницаемости: статической – не более +/- 12 %, фазовой – не более +/- 20 %.

Установка для водогазонасыщения включает: баллон с азотом 1, выпускной

клапан 2, нагрузочное устройство 3, дроссель 4, запорные вентили 5, 8, сосуд с водой 6, фильтр 7, вакуумный насос 10 и прецизионные манометры. Алгоритм работы: включается электродвигатель 10 и проверяется степень вакуумирования манометром 9, открываются вентили 4, 5, 8 и проводится хронометраж флюидонасыщения образца в нагрузочном устройстве 3. Степень вакуумирования и уровень предела нижнего давления регулируются дросселем 4. Перепад давления в образце и вакуумной камере приводит к интенсивному проникновению флюида в геоматериал. После замеров расхода жидкости и перепадов давления закрываются все вентили. Далее контролируют изменения давления при разрушении образца. Исследование фазовой проницаемости геоматериала выполняется путем подачи азота под давлением не более 0,3 МПа.

Установка для сейсмоакустических исследований состоит из прессы 1, датчиков продольных деформаций и силомера 2, аналого-цифрового преобразователя 3, ноутбука 4. Между плитами прессы 6, устанавливается нагрузочное устройство, к которому крепятся приемники акустических колебаний 5. Прием и обработка акустических сигналов в аналоговом режиме осуществляется информационно-измерительной системой АФ-15 и набором датчиков 4, а в цифровом виде – ресивером Pioneer VSX-1520кс каналами 6, 8, 9. Информация регистрируется запоминающим осциллографом С8-14 и ноутбуком. Амплитудно-частотная характеристика корректируется эквалайзером цифрового ресивера, а подавление помех и избирательные измерения САЭ – частотным фильтром ОСК-400-06-15. Измерения выполнены в вариантах «взвешивания» и «локализации». В первом два канала прибора используются для анализа сигнала САЭ. Во втором измерению подлежит время превышения амплитудой анализируемого сигнала двух опорных уровней. Закрепленные на поверхности образца два датчика показывают относительное время восприятия импульса САЭ, по которым определяют положение источника эмиссии. Временные параметры очагов трещинообразования определяют с помощью субблока аппаратуры АФ-15, путем вычисления координат источника САЭ по разности времен прихода сигналов двух событий.

При наличии двух пьезодатчиков на каждой грани кубического образца получают четыре независимых значения $X_1 \dots X_4$, $X'_1 \dots X'_4$ для грани со стороны опорной плиты и $X''_1 \dots X''_4$ со стороны траверсы, по которым строят лучи и определяют координаты вершин магистральных трещин.

Величина погрешности локации импульсов зависит от среды размещения – массива горных пород, его нарушенности горными выработками, пористости пород, водонасыщенности, геологической структуры месторождения и технологической возможности размещения датчиков в пространстве.

Результаты экспериментальных исследований. Исследования разрушения геоматериалов проведено в условиях объемного сжатия в до- и запредельной областях напряжений на образцах углей, песчаников, аргиллитов и алевролитов (по 5-8 образцов каждого литотипа) при разной концентрации флюида. Параметры, которые регистрировали в ходе эксперимента: напряжение сжатия, величина бокового подпора, продольные и поперечные деформации, сигналы САЭ,

время нагружения, а также расчетные значения интенсивности деформации и амплитудно-частотная характеристика импульсов САЭ. Сопоставление результатов осуществляли по параметру «деформация» и отметкам времени нагружения. Примеры отображения результатов приведены на рис. 3-5.

На рис. 3 представлены графики «напряжение-деформация» (« σ - ϵ ») угля марки «К» (а) и кривые соответствующих энергетических затрат на деформирование и разрушение образца (б). На рис. 4 приведен пример скриншота записи САЭ при нагружении образца угля, а на рис. 5 сплайн-поверхность спектральной характеристики выделенного (см. рис. 4) участка импульсов САЭ.

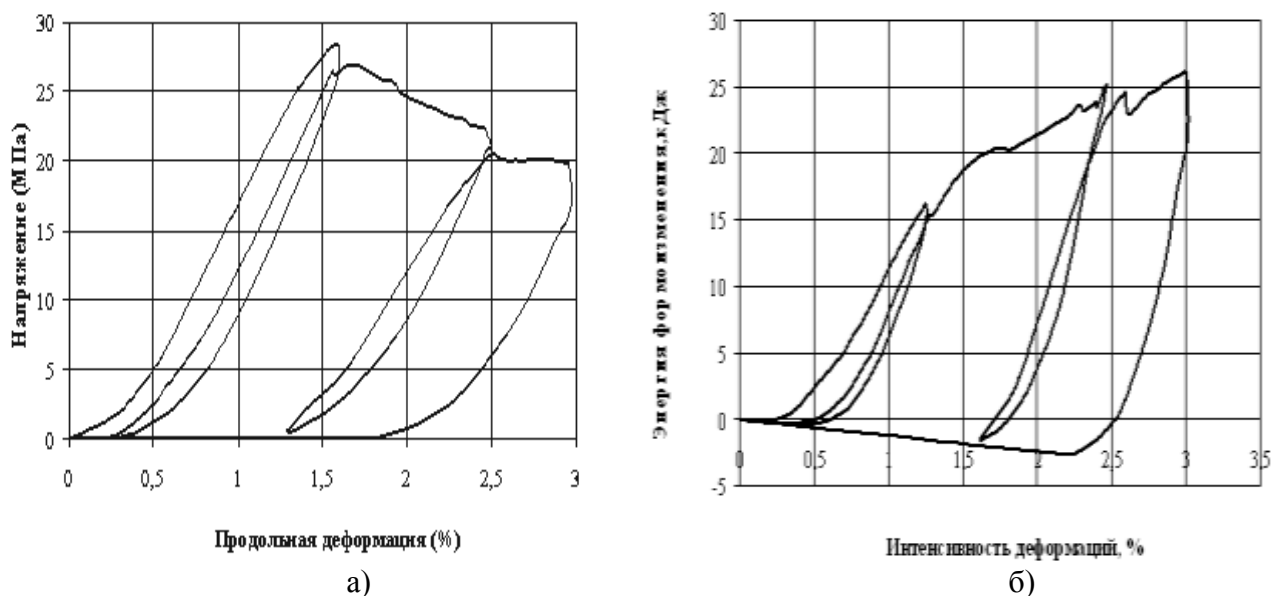


Рисунок 3 – Диаграммы «напряжение – деформация» (а) и энергетических затрат на разрушение образцов (б) флюидонасыщенного угля в условиях объемного сжатия



Рисунок 4 - Скриншот записи САЭ при нагружении образца угля

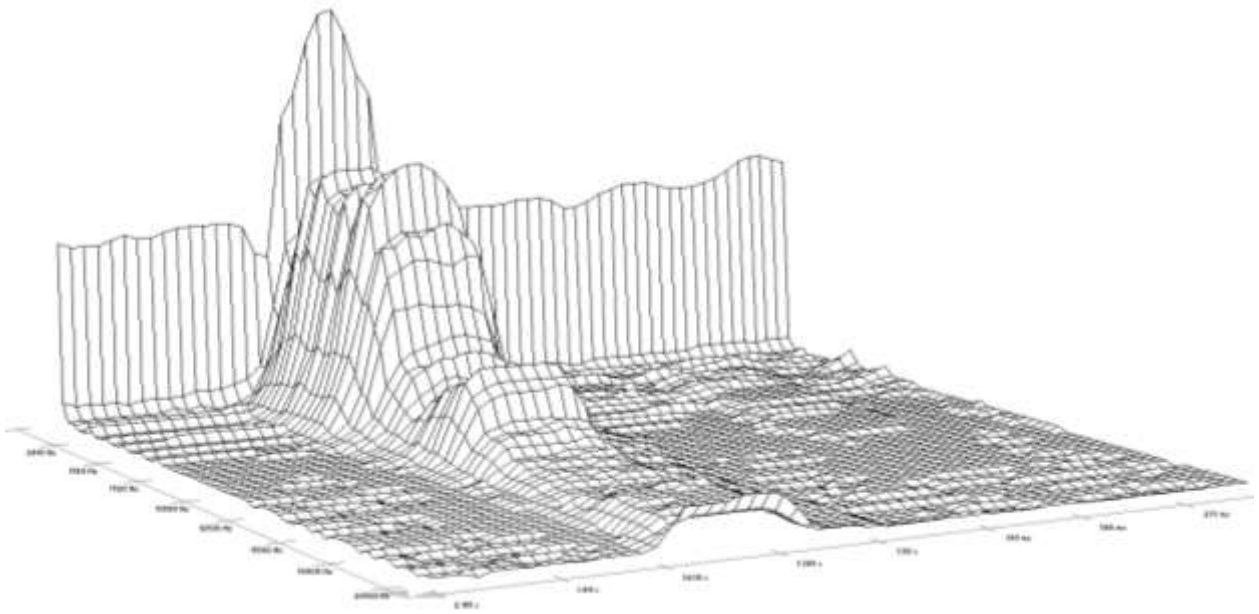


Рисунок 5 – Сплайн амплитудно-частотной характеристики выделенного участка САЭ

Приведенные на рис. 3а диаграммы традиционно дифференцируют шестью характерными областями деформирования: областью ослабления контактных явлений, закрытия макротрещин и макропор; стадией линейного деформирования (область упругих деформаций); областью микрорастрескивания и возникновения поперечных деформаций; стадией интенсивного микрорастрескивания и существенного увеличения поперечных деформаций (область предельных напряжений); стадией разупрочнения и потери несущей способности (запредельная область напряжений); областью остаточной прочности пород [7].

В результате обработки и анализа результатов лабораторных исследований установлено, что за областью упругих деформаций при дальнейшем увеличении всестороннего сжатия в образцах угля и песчаника возникает сдвиговая деформация, которая при достижении определенного уровня переходит в периодическую однородную деформацию. Последняя проявляется на макроуровне в виде пачек линий скольжения и возрастании угла наклона макроплоскостей разрушения в зависимости от угла ориентировки плоскости среза, вида напряженного состояния и скорости деформирования влагонасыщенных образцов.

Для оценки влияния флюидонасыщенности на интенсивность трещинообразования выполнен Фурье-анализ спектрограмм данных САЭ, который базируется на анализе амплитудно-временных и амплитудно-частотных спектров. Отличительная особенность анализа – оценка спектральной плотности и определение модуля постоянной спада акустических сигналов. Установлено, что при стремлении модуля спада спектральной плотности к нулю разрушение геоматериала происходит в виде пластического течения, а при стремлении к единице деструкция происходит в виде хрупкого разрушения по плоскостям ослабления в зависимости от степени увлажнения.

Анализ энергетики процесса показал, что интенсивность разрушения зависит от величины порового пространства и влагоемкости геоматериала, которая

определяется проницаемостью среды и уменьшается с ростом давления всестороннего сжатия и влаги. Отмеченная закономерность связана с типом пористости. Так, для пород с трещинным типом структуры порового пространства (пористость меньше 3 %) отмечается зависимость проницаемости по газу от давления всестороннего сжатия. С увеличением давления всестороннего сжатия до 100 МПа коэффициент проницаемости (по абсолютной величине) уменьшается на три и более порядка. Для пород с трещинно-поровым типом структуры порового пространства (пористость от 3 до 8 %) характерна более слабая зависимость проницаемости от давления всестороннего сжатия (коэффициент проницаемости уменьшается по абсолютной величине на один-два порядка). Для пород с поровым типом структуры (пористость более 10 %) коэффициент проницаемости практически не зависит от давления всестороннего сжатия.

Исследования поведения слабых горных пород (алевролитов, аргиллитов, песчаников с глинистым цементом и мелкозернистых) при всестороннем сжатии показали, что при отсутствии дренажа поровое давление насыщенного водой, например песчаника с временным сопротивлением одноосному сжатию 5 МПа, уравнивается с давлением всестороннего сжатия при значении 7,5 МПа.

При совместном анализе данных механических испытаний и САЭ были выделены четыре характерные области (стадии) механоэмиссионных процессов.

На первой стадии происходит закрытие трещин, причем, в основном, в продольном направлении. При этом суммарная поверхность трения увеличивается, что сопровождается увеличением сейсмоакустической активности (САА). Происходит уплотнение материала и увеличение модуля упругости.

Переход ко второй стадии отмечается изменением знака кривизны на зависимости « σ - ϵ » и резким увеличением САЭ. Возникают новые трещины, распределенные по объему образца, увеличивается САА, в том числе вызванная образованием трещин отрыва. Модуль упругости уменьшается.

Переход к третьей стадии отмечен максимумом САА. При этом образуются поверхности скольжения, благодаря кластеризации (концентрации в определенных областях) возникающих трещин. Данный эффект наблюдается в областях конусных поверхностей, что (в последствии) придает разрушающемуся образцу форму песочных часов. Дальнейшее развитие процесса приводит к увеличению деформаций при меньших нагрузках, т. е. образец переходит в четвертую стадию запредельного деформирования.

Из анализа диаграмм САЭ следует, что для угля, в отличие от песчаника, характерна значительная (в 2-3 раза большая) продолжительность САА на первой и второй стадиях. Кроме того, максимальная САА для угля на третьей стадии в 1,6 раза превышает ее для песчаника. Четвертая стадия у песчаника растянута во времени и приблизительно в два раза превышает стадию у угля. Особенность спектральных характеристик для угля (по сравнению с песчаником) заключается в более высоких частотах и амплитудах сигнала САЭ.

Вид зависимости « σ - ϵ », характер САА и ее амплитудно-частотные характеристики существенно меняет влагонасыщенность пород. Так, для образцов су-

хого угля уже на первой стадии отмечается достаточно четко выраженный всплеск активности САЭ в высокочастотной области спектра. В начале области пластической деформации САА затухает и переходит в область низких частот. Дальнейшее увеличение продольной деформации при переходе материала в область запредельного деформирования приводит к увеличению САА в высокочастотной части спектра, но уже не в такой степени, а спектр содержит, в основном, низкочастотные сигналы с высокой величиной амплитуды.

Для влагонасыщенного угля САА намного выше на первых двух стадиях. Период затишья перед началом третьей стадии относительно невелик, переход к третьей стадии наступает раньше, а максимальная активность в ней несколько ниже, чем у сухого угля. В начале четвертой стадии отмечается длительный период затишья. В спектре высокочастотные значения отмечаются в узком диапазоне на границе 1 и 2 стадий, а также при переходе в запредельную область.

Увеличение САА на первых двух стадиях нагружения для влагонасыщенных образцов объясняется тем, что при их деформировании наблюдается интенсивное зарождение новых мелких трещин за счет микрогидроразрывов пористой структуры. При этом происходит не только рост находящихся в одной плоскости трещин, но и появление соединяющих их каналов, приводящих к слиянию изолированных друг от друга трещин.

Анализ диаграмм « σ - ε », изменений коэффициента разрыхления, скорости деформаций, энергетических характеристик и САЭ позволил выделить основные этапы формирования напряженного состояния геоматериала и последовательность развития сколовых и сдвиговых деформаций при трещинно-поровых образованиях. Эти этапы можно разделить на 7 стадий. Первая – начальный этап пригрузки и снижение проницаемости образцов. Акустические сигналы определяются в виде «шороха» (низкие частоты, незначительная амплитуда, слабая энергетическая плотность сигналов). Вторая – начало упругого деформирования (смыкание трещин, исчезновение проницаемости). САЭ небольшой длительности, время нарастания продолжительное, энергетические показатели слабые. Третья – упругое деформирование (трещины закрыты, поры изолированы). Появляются импульсы, связанные с дефектностью геоматериала, характеристики акустических импульсов аналогичны второй стадии. Четвертая – первый этап упруго-пластического деформирования (рост проницаемости). САЭ большой амплитуды, длительность импульсов незначительная, спектральная плотность сигналов и частота импульсов высокая (до 5-6 кГц). Пятая – область предельного состояния (рост проницаемости за счет трещинообразования). Длительность и амплитуда импульсов повышаются, время нарастания минимальное, энергетическая плотность очень высокая. Шестая – начало консолидации трещин (интенсивный рост проницаемости, связанный с образованием трещинно-порового пространства). Для этой области характерно наложение импульсов, все параметры не стабильны. Седьмая – область пластического течения (формирование сдвиговых других трещин, проницаемость интенсивно

увеличивается). Для САЭ характерны низкая амплитуда и частота, импульсы

возникают только за счет сдвигового трения берегов магистральных трещин.

Т. к. площадь каждой из указанных стадий разрушения эквивалентна энергетической плотности сигнала САЭ, можно определить баланс энергий, что позволит перейти к прогнозу стадии деформирования массива по данным сейсмоакустических наблюдений. Необходимо только учитывать, что с изменением условий нагружения и влажности в процесс деформирования включается разное число плоскостей сдвига, поэтому разрушение может произойти не по всем единичным плоскостям сдвига, включившимся в процесс деформирования, а по какой-то одной плоскости в силу разброса их прочности и упругости. Именно поэтому для выявления механизмов трещинообразования и отклика на него САЭ важно знать факторы, определяющие эти процессы и поведение геоматериала при разрушении [8, 9].

Результаты статистической обработки значений сопротивления сжатию ($\sigma_{сж}$), растяжению (σ_p) и угла внутреннего трения (φ) пород и угля при одноосном сжатии и увлажнении (W) геоматериала (коллектора) представлены в табл.1.

Таблица 1– Связь прочностных свойств геоматериала с влагонасыщенностью

Тип коллектора	Установленная корреляционная зависимость	Коэффициент корреляции (r)	Надежность коэффициента r
Песчаник крупнозернистый	$\sigma_{сж} = -14,63W + 110,42$	0,69	5,27
	$\sigma_p = -2,41W + 16,87$	0,54	2,64
	$\varphi = 1,29W^2 - 15,97W + 83,66$	0,68	5,06
Песчаник мелкозернистый	$\sigma_{сж} = -12,52W + 77,44$	0,75	6,41
	$\sigma_p = -2,49W + 14,30$	0,57	2,79
	$\varphi = W^2 - 12,40W + 62,23$	0,53	2,55
Уголь монолитный	$\sigma_{сж} = -3,91W + 63,49$	0,65	5,16
	$\sigma_p = -0,61W + 5,77$	0,62	4,82
	$\varphi = 2,77W^2 - 33,97W + 139,64$	0,71	4,73
Уголь с нарушенной структурой	$\sigma_{сж} = -9,48W + 77,87$	0,58	3,72
	$\sigma_p = -0,58W + 4,23$	0,53	3,50
	$\varphi = 4,86W^2 - 55,99W + 187,96$	0,55	3,40

Результаты определения очагов генерирования трещин и записи формы акустических сигналов были использованы для исследований частотных особенностей САЭ при образовании трещин различного типа. Идентификацию трещин выполняли по частотному составу и диапазону генерирования, амплитуде, времени вступления и знаку первой фазы.

Перечисленные параметры в пределах одного цикла нагружения при изменении нагрузки изменялись незначительно. Однако при тех же координатах и уровне нагрузки возникали отдельные акустические сигналы других частот и амплитуд. Форма записи сигналов и их параметры также существенно отлича-

ются при параметризации импульсов. В связи с чем была выдвинута гипотеза о том, что при разрушении образцов угля, ввиду различия их строения и состава, образуются разные виды трещин – сдвиговые, сколовые, Редела и их комбинации. Результаты изучения САЭ указывают на возникновение очагов структурной нарушенности, которые приводят к образованию магистральных трещин, скорость распространения которых изменяется в пределах от 0,3 до 1,9 км/с, но не более чем скорость продольных волн в образцах. Возникшие области нарушенности структуры являются участками микротрещинообразования, а неоднородности этих участков – очагами развития магистральных трещин и окончательного разрушения геоматериала. Общая деформация зависит от числа единичных включившихся в процесс плоскостей, величины остаточной пластичности на плоскости, что определяется структурно-текстурными особенностями геоматериала.

Выводы.

Повышение напряжений в горных породах даже в области упругих деформаций провоцирует развитие процесса неравномерного по объему микроуплотнения, что ведет к формированию зон повышенных концентраций напряжений и разрыву внутренних связей. В предельной и запредельной областях напряжений процессы дезинтеграции пород на порядок активнее, что обосновывает информативность метода, базирующегося на регистрации САЭ пород, при контроле напряженно-деформированного состояния массива во всем возможном диапазоне изменений горного давления.

Точность оценки напряженно-деформированного состояния массива по комплексу сейсмоакустических характеристик обеспечивает принцип кусочно-линейной аппроксимации. Для этого весь возможный размах изменения величины информативного параметра разбивается на несколько интервалов, а зависимости аппроксимируются линейными отрезками внутри этих интервалов. Учет нелинейности сложной формы полиномами низких степеней значительно повышает устойчивость решения обратных задач при контроле процесса трещинообразования и формирования напряжений в среде.

Предложенная модель акусто-эмиссионных эффектов, основанная на явлении роста существующих трещин на границах структурных элементов при повышении давления, позволяет методом САЭ определить не только местоположение источника эмиссии, но и оценить характеристики трещин, а также напряженное состояние и флюидонасыщенность среды. Для повышения достоверности оценки напряженного состояния угольного пласта по величине смещения максимума спектральной плотности САЭ необходимо учитывать горно-геологические условия, а также совокупность физико-механических свойств угля и боковых пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метаногенерация в угольных пластах / А.Ф. Булат, С.И. Скипочка, Т.А. Паламарчук, В.А. Андиферов – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2010. – 328 с.
2. Методические рекомендации по геофизическому контролю и диагностике геомеханического

состояния подземных геотехнических систем угольных шахт / А.Ф. Булат, Б.М. Усаченко, С.И. Скипочка [и др.]. – Днепропетровск-Донецк: ВИК, 2009. – 80 с.

3. Локализация очагов аккумуляции метана в угольном пласте сейсмическим методом / М.В. Курленя, А.С. Сердюков, С.В. Сердюков, В.А. Чеверда // ФТПРПИ. – 2010. - № 6. - С. 37-47.

4. Анциферов, А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки / А.В. Анциферов. – Донецк: ООО «Алан», 2003. – 312 с.

5. Numerical investigation of coal and gas outbursts in underground collieries / Т. Ху, С.А. Танг, Т.Н. Янг [and others] // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – № 4. – 2006. – Pp. 905-919.

6. Разин, А.В. Об излучении волн Стоунли нормальным к границе газ – твердое тело гармоническим силовым источником / А.В. Разин // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1991. - №12. – С. 100-104.

7. Виноградов, В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов. – К.: Наук. думка, 1990. – 192 с

8. Николаевский, В.Н. Геомеханика и флюидодинамика / В.Н. Николаевский. – М.: Недра, 1996. – 447 с.

9. Permeability characterization of the Soutl and Ogachi large-scale reservoir using induced microseismicity / К. Oset, М. Ptak, Р. Mazik, S. Chmielarz // Geophysics. – № 67 (1). – 2002. – Pp.204-211.

REFERENCES

1. Bulat, A.F., Skipochka, S.I., Palamarchuk, T.A. and Antsiferov, V.A. (2010), *Metanogeneracia v ugolnyh plastah* [Methane generation in coal seams], Lira, Dnepropetrovsk, Ukraine.

2. Bulat, A.F., Usachenko, B.M., Skipochka, S.I. [and others] (2009), *Metodicheskiye rekomendatsiyi po geofizicheskomu kontrolyu i diagnostike geomexanicheskogo sostoyaniya podzemnyh goetehnicheskyyh sistem ugolnyh shaht* [Methodical recommendations about geophysical control and diagnostics of geomechanical state of underground geotechnical system of coal mines], VIK, Donetsk-Dnepropetrovsk, Ukraine.

3. Kurlenya, M.V., Serdyukov, A.S., Serdyukov, S.V. and Cheverda, V.A. (2010), "Localization of methane accumulation centers in coal seam by seismic method", *FTPRPI*, no. 6., pp. 37-47.

4. Antsiferov, A.V. (2003), *Teoriya i praktika shahtnoy seismorazvedky* [Theory and practice of mine seismic exploration], "Alan" Ltd, Donetsk, Ukraine.

5. Xu, T., Tang, C.A. and Yang, T.H. (2006), «Numerical investigation of coal and gas outbursts in underground collieries», *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, no. 4, pp. 905-919.

6. Razin, A.V. (1991), «On the radiation of Stonely waves normal to the gas-solid interface by a harmonic force source», *News AS of USSR. Physics of the Earth*, no. 12, pp. 100-104.

7. Vinogradov, V.V. (1989), *Geomexanika upravleniya sostoyaniyem massiva vblizi gornyykh vyrabotok* [Geomechanics of control by the state of array near the rock making], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

8. Nikolaevskiy, V.N. (1996), *Geomexanika i fluidodinamika* [Geomechanics and fluidodynamics], Nedra, Moscow, Russia.

9. Oset, K., Ptak, M., Mazik, P. and Chmielarz, S. (2002), Permeability characterization of the Soutl and Ogachi large-scale reservoir using induced microseismicity, *Geophysics*, no. 67 (1), pp.204-211.

Об авторах

Булат Анатолий Федорович, академик Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, директор института, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, office.igtm@nas.gov.ua

Скипочка Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, skipochka@ukr.net

Пилипенко Юрий Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, geotechnika@mail.ua

Дякун Роман Анатольевич, кандидат технических наук, научный сотрудник в отделе управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины),

About the authors

Bulat Anatoly Fedorovich, Academician of the National Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Director of the Institute, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, office.igtm@nas.gov.ua

Skipochka Sergey Ivanovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Head of Rock Mechanics Department, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, skipochka@ukr.net

Pilipenko Jury Nikolayevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, geotecnika@mail.ua

Dyakun Roman A., Candidate of Technical Science (Ph.D.), Researcher in the Department of Pressure Dynamic Control in Rocks, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (NASU IGTM), Dnepr, Ukraine, romen@ua.fm

Анотація. Предмет досліджень – методологія контролю властивостей і стану вуглепородного масиву. Мета роботи – теоретико-експериментальне обґрунтування акусто-емісійного методу контролю масиву. Викладено елементи теорії акусто-емісійного контролю, методика, прилади та результати експериментальних досліджень гранично-напружених флюїдонасичених порід. Наведено способи вивчення та інтерпретації результатів геофізичних спостережень дезінтеграції флюїдонасичених геоматеріалів в складному напруженому стані, що базуються на положеннях теорії ліній ковзання. Описано підходи до вирішення задачі про напружено-деформований стан флюїдонасиченого вугільного пласта шляхом встановлення коефіцієнтів автокореляції між тимчасовими сейсмоакустичними подіями. Дано експериментальне обґрунтування методів комплексного контролю з визначенням рівня дезінтеграції Фур'є-оцінкою амплітудно-частотних і амплітудно-часових спектрів.

Ключові слова: масив гірських порід, флюїди, руйнування, сейсмоакустика, спектр.

Abstract. Subject of the research is a methodology for state and properties control of coal rock. Objective of the research is theoretical and experimental substantiation for acoustic-emission massif state control. Elements of acoustic-emission control theory, methodology, means and experiments results of fluid-saturated geomaterials under complex stress state are given. Interpretation of the results of geophysical observations destruction geomaterial theory is based on the provisions of the slip lines. Possible ways to solve the problem of the stress-strain state of fluid-saturated coal seam by setting the autocorrelation coefficients between seismoacoustic events were described. The experimental validation of complex control methods with Fourier disintegration level determination - amplitude-frequency and amplitude-time spectra evaluation were given.

Keywords: rock massif, fluids, destruction, seismoacoustics, spectrum.

Стаття поступила в редакцію 20.03.2016

Рекомендовано к печати д-ром геол. наук Л.И. Пимоненко