

**СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА
В ЗОНАХ РАЗРЫВНЫХ ДИСЛОКАЦИЙ**

Представлено універсальний аналітичний апарат для опису напружено-деформованого стану вугільного пласта в зоні мало амплітудних тектонічних порушень на прикладі використання сейсмоакустичного метода контролю.

**SEISMOACOUSTIC MONITORING OF STRESS STATE OF COAL-ROCK
MASSIF IN THE ZONES OF DISCONTINUOUS DISLOCATIONS**

It is presented versatile analytical apparatus to describe the stress and strain state of the coal seam in the zone of tectonic small amplitude violations by using of seism acoustic method.

Безаварийность горных работ на угольных месторождениях при переходе зон тектонических нарушений можно обеспечить путем решения следующих взаимосвязанных задач: оценкой геометрических параметров малоамплитудных тектонических нарушений углепородного массива; прогнозом структуры локальных полей напряжений в окрестностях тектонических нарушений и оценкой геодинамического состояния углепородного массива; проведением дегазационных мероприятий; принятием технологических решений по переходу зон с нарушенной структурой угля; разработкой средств и способов поддержания боковых пород в зоне тектонических нарушений и способов управления состоянием угольного массива, применение которых позволит снизить потери угля и повысить технико-экономические показатели работы добычного участка. Решение отмеченных выше задач можно осуществить только при наличии эффективных способов управления газовыделением и технологического контроля свойств и состояния массива горных пород. В качестве метода непрерывного контроля динамики напряженного состояния углепородного массива применяется сейсмоакустический (СА) метод, получивший широкое распространение на угольных шахтах Донбасса. В работе предложена универсальная методика определения изменения напряженно-деформированного состояния углепородного массива при ведении очистных работ в зонах разрывных дислокаций.

Известно, что в процессе разрушения горных пород возникают механоакустические преобразования, проявляющиеся в виде перестройки связей, изменения их прочностных и деформационных свойств [1,2]. Состояние среды, адекватно отражающее динамику процесса разрушения (деформирования), можно охарактеризовать интенсивностью сейсмоакустических событий. В наиболее общем виде взаимосвязь напряженного состояния среды и сейсмоакустической эмиссии (СЭ) описывается с помощью параметрических сплайн-функций [3]. Пусть кривая, характеризующая зависимость сейсмоакустических параметров от напряжений (рис. 1), задана в плоскости OX_1X_2 своими параметрическими уравнениями:

$$X_k = \varphi_k(t) \quad (k=1;2); \quad t \in [a,b],$$

где $\varphi_k(t)$ – гладкие функции.

Ее можно аппроксимировать при помощи параметрических сплайн-функций. Для этого введем на некотором отрезке $[a,b]$ произвольное разбиение δ_n :

$$a = t_0 < t_1 < \dots < t_{n-1} < t_n = b$$

и обозначим: $\varphi_k^{(i)}(t) = d^i \varphi_k / dt^i$ ($i = 0,1$); $\varphi_k^{(0)}(t) = \varphi_k(t)$ ($k = 1;2$); $h_i = t_{j+1} - t_j$ ($j = 0,1,\dots, n-1$); $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие; σ_y, σ_c – соответственно напряжения в области упругих деформаций и остаточной прочности; F_0, F_y, F_n, F_c – соответственно: фоновое значение сейсмоакустических параметров, их значение в области упругих деформаций, в предельной области напряжений и в области остаточных напряжений; $\nu = \nu_{min}$ – точка с минимальным значением коэффициента Пуассона.

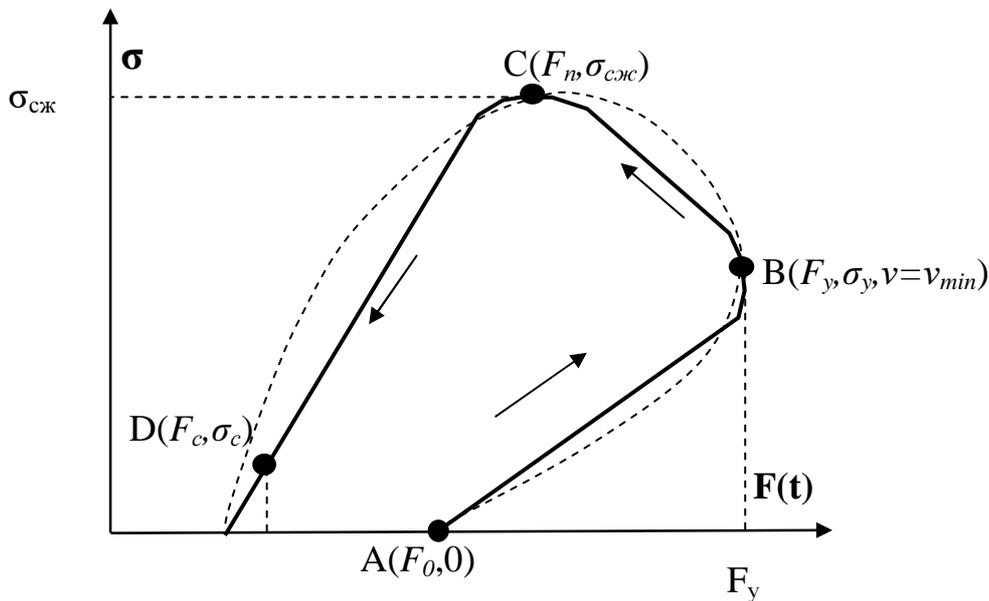


Рис. 1 – Характер взаимозависимости сейсмоакустических параметров и механических напряжений

Кривой ABCD поставим в соответствие параболическую эрмитовую сплайн-кривую $S_2(\gamma)$, которая на каждом промежутке $[t_j, t_{j+1}]$ ($j=0,1,\dots, n-1$) задается уравнениями:

$$S_2(j, \varphi_k, t) = \sum_{p,i=0}^1 \varphi_k^{(i)}(t_{j+p}) \psi_{j,p}(t) \quad (k=1,2), \quad (1)$$

где

$$\psi_{1,0}(t) = \begin{cases} (t-t_j)(2t_{j+1}+t_j-3t)/2h_j, & t_j \leq t \leq t_{j+1/2} \\ (t_{j+1}-t)^2/2h_j, & t_{j+1/2} \leq t \leq t_{j+1} \end{cases}; \quad \psi_{1,1}(t) = \begin{cases} -(t-t_j)^2/2h_j, & t_j \leq t \leq t_{j+1/2} \\ (t_{j+1}-t)(t_{j+1}+2t_j-3t)/2h_j, & t_{j+1/2} \leq t \leq t_{j+1} \end{cases};$$

$$\psi_{0,1}(t) = 1 - \psi_{0,0}(t);$$

$$\psi_{0,0}(t) = \begin{cases} 1 - 2 \left(\frac{t - t_j}{h_j} \right)^2, & t_j < t < t_{j+1/2} = (t_j + t_{j+1})/2 \\ 2 \left(\frac{t_{j+1} - t}{h_j} \right)^2, & t_{j+1/2} \leq t \leq t_{j+1} \end{cases},$$

интерполирует в точках $A_j(\varphi_1(t_j), \varphi_2(t_j))$ ($j=0,1,\dots,n$) и имеет в A_j тот же угол наклона касательной к оси OX_1 , что и γ .

Подставляя в формулу (1) вместо $\varphi_k^{(1)}(t_j)$ их приближенные значения $\hat{\varphi}_k^{(1)}(t_j)$, рассчитанные на основании имеющейся информации о кривой γ , при $j=0$ и $j=n$, соответственно получим:

$$\begin{cases} \hat{\varphi}_k^{(1)}(t_0) = [\varphi(t_1) - \varphi(t_0)]/h_0, \\ \hat{\varphi}_k^{(1)}(t_n) = [\varphi(t_n) - \varphi(t_{n-1})]/h_{n-1} \end{cases} \quad (2)$$

Применяя для остальных t_j ($j=2,\dots,n-1$) интерполяционные полиномы Лагранжа $l_2(\varphi_k, t)$ степени 2, интерполирующие $\varphi_k(t)$ в точках t_{j-1}, t_j, t_{j+1} , и вычисляя значения их первых производных в точках t_j , запишем:

$$\hat{\varphi}_k^{(1)}(t_j) = l_2^{(1)}(\varphi_k, t_j) = -\varphi_k(t_{j-1}) \frac{h_j}{h_{j-1}(h+h_{jn})} - \varphi_k(t_j) \frac{h_{j-1} - h_j}{h_{j-1} \cdot h_j} + \varphi_k(t_{j+1}) \frac{h_{j-1}}{h_j(h_{j+1} + h_j)} \quad (3)$$

В качестве параметра целесообразно использовать длину ломаной с вершинами в точках интерполяции A_j ($j=0,1,\dots,n$), отсчитываемую от A_0 . В этом случае $t_0=0$, $t_n=\alpha$, где α длина всей кривой. Используем кусочно-полиномиальные функции для описания деформационных кривых $G(\varepsilon_1)$ и $K(\varepsilon_3)$, полученные для одной и той же пробы (рис. 1). Приближенные уравнения деформационных кривых будут иметь следующий вид:

$$G(\varepsilon_1) = \begin{cases} \sigma_{сж} \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1^n} \right)^2 + 2\sigma_{сж} \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1^n} \right); & 0 \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_1^n \\ \sigma_{сж} + (\sigma_c - \sigma_{сж})(\varepsilon_1 - \varepsilon_1^n)^2 / (\varepsilon_1^0 - \varepsilon_1^n); & \varepsilon_1^n \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_1^0 \end{cases} \quad (4)$$

$$K(\varepsilon_3) = \begin{cases} \sigma_{сж} \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_3^n}; & 0 \leq \varepsilon_3 \leq \varepsilon_3^n \\ \sigma_{сж} + (\sigma_c - \sigma_{сж})(\varepsilon_3 - \varepsilon_3^n)^2 / (\varepsilon_3^0 - \varepsilon_3^n)^2; & \varepsilon_3^n \leq \varepsilon_3 \leq \varepsilon_3^0 \end{cases} \quad (5)$$

где ε_1 и ε_3 – соответственно продольная и поперечная деформация образца; ε_1^n , ε_3^n и ε_1^0 , ε_3^0 – значения деформации, соответствующие пределу прочности на сжатие и остаточному напряжению на полных деформационных кривых.

Отметим, что участку OA деформационной кривой (рис. 2) соответствует дуга AB на рис. 1, участку AB – дуга CB, участку BC – дуга DC.

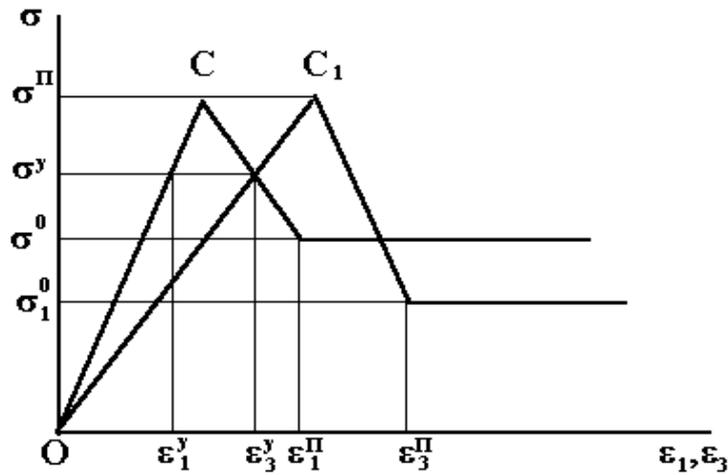


Рис. 2 – Схематические диаграммы “напряжение-деформации” для условий объемного сжатия

Решая соотношения $\sigma = G(\varepsilon_1)$ и $\sigma = K(\varepsilon_3)$ на участках монотонности OAB и BC (рис. 1) или, что то же самое, на участках ABC и CD (рис. 2) относительно ε_1 и ε_3 , получим:

$$\varepsilon_1(\sigma) = \begin{cases} \varepsilon_1^n [1 - (1 - \frac{\sigma}{\sigma_{сж}})^2]^{\frac{1}{2}}; 0 \leq \sigma \leq \sigma_{сж} \\ \varepsilon_1^n + (\varepsilon_1^0 - \varepsilon_1^n) [(\sigma - \sigma_{сж}) / (\sigma_c - \sigma_{сж})]^{\frac{1}{2}}; \sigma_c \leq \sigma \leq \sigma_{сж} \end{cases},$$

$$\varepsilon_3(\sigma) = \begin{cases} \sigma \frac{\varepsilon_3^n}{\sigma_{сж}}; 0 \leq \sigma \leq \sigma_{сж} \\ \varepsilon_3^n + (\varepsilon_3^0 - \varepsilon_3^n) [(\sigma - \sigma_{сж}) / (\sigma_c - \sigma_{сж})]^{\frac{1}{2}}; \sigma_c \leq \sigma \leq \sigma_{сж} \end{cases}. \quad (6)$$

Используя формулы (4), (5), вычислим коэффициент Пуассона полной деформационной кривой $\nu = \frac{\varepsilon_3(\sigma)}{\varepsilon_1(\sigma)}$. На участке восходящей кривой (OAB) рис. 1

(1) получим:

$$\nu = \nu_n \frac{\sigma / \sigma_{сж}}{1 - [1 - (\frac{\sigma}{\sigma_{сж}})^2]^{\frac{1}{2}}}. \quad (7)$$

На ниспадающем участке кривой (BC) (рис. 1) имеем:

$$\nu = \frac{\varepsilon_3^n + (\varepsilon_3^0 - \varepsilon_3^n) \left(\frac{\sigma - \sigma_{сж}}{\sigma^0 - \sigma_{сж}} \right)^{1/2}}{\varepsilon_1^n + (\varepsilon_1^0 - \varepsilon_1^n) \left(\frac{\sigma - \sigma_{сж}}{\sigma^0 - \sigma_{сж}} \right)^{1/2}}. \quad (8)$$

Разрешая соотношения (7) и (8) относительно σ , получим на кривой ОАВ (рис. 2):

$$\sigma = 2\sigma_{сжс} \frac{vV_n}{v^2 + V_n^2}, \quad 0 \leq v \leq v_n; \quad (9)$$

кривой ВС:

$$\sigma = \sigma_{сжс} - (\sigma_{сжс} - \sigma_c) \left(\frac{v - v_n}{v - v_n + (v_0 - v)\epsilon_1^0 / \epsilon_1^n} \right)^2, \quad v_n \leq v \leq v_0, \quad (10)$$

где $v_0 = \frac{\epsilon_3^0}{\epsilon_1^0}$ - выражения напряжений через коэффициент Пуассона полной деформационной кривой.

Отметим участки АВ, ВС, CD зависимости САЭ от механических напряжений, изображенных на рис. 1.

На участке упругого деформирования АВ имеем:

$$\sigma = \sigma_y \left(\frac{F(t) - F(t)_0}{F(t)_y - F(t)_0} \right), \quad F(t)_0 \leq F(t) \leq F(t)_y. \quad (11)$$

На участке ВС, соответствующем предельному состоянию, получим

$$\sigma = (\sigma_y - \sigma_{сжс}) \left(\frac{F(t) - F(t)_n}{F(t)_y - F(t)_n} \right) + \sigma_{сжс}, \quad F(t)_n \leq F(t) \leq F(t)_y. \quad (12)$$

На участке CD, соответствующем пластическим деформациям, запишем:

$$\sigma = -\sigma_{сжс} \left(\frac{F(t) - F(t)_c}{F(t)_n - F(t)_c} \right) + 2\sigma_{сжс} \frac{F(t) - F(t)_c}{F(t)_n - F(t)_c}, \quad F(t)_c \leq F(t) \leq F(t)_n. \quad (13)$$

Приравнивая правые части формул (9) и (11) на участке упругих деформаций, получим:

$$2\sigma_{сжс} \frac{vV_n}{v^2 + V_n^2} = \sigma_y \left(\frac{F(t) - F(t)_0}{F(t)_y - F(t)_0} \right)^2. \quad (14)$$

Разрешая (14) относительно $F(t)$, запишем:

$$F(t) = \left(2 \frac{\sigma_{сжс}}{\sigma_y} \cdot \frac{vV_n}{v^2 + V_n^2} \right)^{\frac{1}{2}} [F_y(t) - F_0(t)] + F_0(t); \quad 0 \leq v \leq v_y, \quad (15)$$

где $v_y = \epsilon_3^y / \epsilon_1^y$.

Приравнивая правые части соотношений (9) и (12) на участке ВС, соответствующем предельному состоянию, получим:

$$2\sigma_{сжс} \frac{vV_n}{v^2 + V_n^2} = (\sigma_y - \sigma_{сжс}) \left(\frac{F(t) - F(t)_n}{F(t)_y - F(t)_n} \right)^2 + \sigma_{сжс}. \quad (16)$$

Из выражения (16):

$$F(t) = (F(t)_y - F(t)_n) \left(\frac{\sigma_{сжс}}{(\sigma_{сжс} - \sigma_y)(v_n^2 + v^2)} \right)^{1/2} + F_n(t); \quad v_y \leq v \leq v_n, \quad (17)$$

Приравнивая правые части соотношений (10) и (13), на участке трещиноватости CD, получим:

$$\left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{сжс}} \right) \left(\frac{v - v_n}{v - v_n + (v_0 - v) \varepsilon_1^0 / \varepsilon_1^n} \right)^2 = \left(\frac{F(t) - F(t)_c}{F(t)_n - F(t)_c} - 1 \right)^2. \quad (18)$$

Отсюда:

$$F(t) = (F_n(t) - F_c(t)) \left[\left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{сжс}} \right)^{1/2} \cdot \frac{v - v_n}{v - v_n + (v_0 - v) \varepsilon_1^0 / \varepsilon_1^n} + 1 \right] + F_c(t), \quad v_n < v < v_0 \quad (19)$$

Полученные соотношения (15, 17, 19) позволяют описать состояние среды на всех стадиях разрушения угольного пласта и боковых пород, оценить напряженное состояние массива [4]. В качестве исходной информации применяют результаты разрушений образцов горных пород на жестких испытательных машинах, с определением коэффициентов масштабного фактора и сопоставлением с результатами шахтных работ.

Таким образом, теоретически обосновано применение геофизического метода, базирующегося на регистрации сейсмоакустической активности среды и отражающего изменение напряженного состояния массива горных пород. С учетом свойств горных пород получены аналитические зависимости, описывающие связь геомеханического состояния среды и СА параметров. Показано, что оценку напряженно-деформированного состояния массива по комплексу СА показателей горных пород необходимо проводить, используя принцип кусочно-линейной аппроксимации. При этом весь возможный размах изменения величины 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 напряженного состояния среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Анцыферов М.С. Сейсмоакустические исследования и проблема прогноза динамических явлений / М.С. Анцыферов, Н.Г. Анцыферова, Я.Я. Качан. – М.: Наука, 1971. – 110 с.
3. Вакарчук С.Б. Аппроксимация кривых и поверхностей сплайнами / С.Б. Вакарчук. – К.: Ин-т математики АН УССР, 1982. – 48 с.
4. Определение очагов трещинообразования и напряженного состояния массива методом многоканальной сейсмоакустики / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеев, Ю.Н. Пилипенко [и др.] // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Матер. XX Межд. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т. – 2010. – С. 75-77.