УДК 622.8313:551.25:539.4

А.М. Демин, С.Е. Чирков, Б.К. Норель, А.В. Лиманский

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД В ОБЪЕМНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Составлены аналитические зависимости для получения деформационных, прочностных и энергетических показателей образцов углей и горных пород в объемном напряженном состоянии. Проведены механические испытания на установках специального вида (установки трехосного неравнокомпонентного сжатия).

Предложен и обоснован энергетический критерий прочности углей в объемном напряженном состоянии.

Ключевые слова: деформация, прочность, горная порода, напряжение.

Аналитические исследования механического поведения породного массива постоянно ставит новые проблемы при описании физических и механических процессов этой исключительно сложной среды. В настоящее время научный интерес к физико-механическому моделированию процессов вызван требованиями промышленности при разработке полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях и прогнозированию нежелательных физических процессов. В.Н. Родионов с сотр. [1], формулируя новые положения в современной геомеханике, отмечает, что сложная «структура массива не просто носит следы разрушения, представляет способ существования горного массива при больших необратимых процессах».

Научные положения развиваемой современной геомеханики формулируют задачи новых направлений. В настоящей работе делается попытка несколько детализировано описать возможности получения механических свойств горных пород в объемном напряженном состоянии, что позволяет обосновать особенности механических свойств при достаточно сложных условиях нагружения. Определяем основные понятия к схеме Надаи: *главные оси нагружения, главные напряжения, главные виды напряженных состояний*.

Напряжения в точке среды в пространственной системе координат ***x, y, z*** описываются симметричным тензором напряжений (с учетом действия основного закона симметрии касательных напряжений $\tau_{ji} = \tau_{ij}$ [2]:

$$\tau_\sigma = \begin{Vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{Vmatrix} \qquad (1)$$

Прикладывая нормальное напряжение σ и касательное напряжение τ к площадке, установленной относительно осей 0_x, 0_y и 0_z, определяем направляющие косинусы ***l***, ***m*** и ***n*** от нормального напряжения σ с нормалью ***OP*** к этим косинусам, тогда:

$$\sigma = l^2\sigma_x + m^2\sigma_y + n^2\sigma_z + 2mn\tau_{yz} + 2nl\tau_{zx} + 2lm\tau_{xy} \quad (2)$$

Компоненты действующего нагружения – осевое напряжение $\boldsymbol{\sigma}$ и касательное напряжение $\boldsymbol{\tau}$ представляют в математическом смысле функции показателей тензора напряжений (1) и направляющих косинусов $\boldsymbol{m}$, $\boldsymbol{l}$, $\boldsymbol{n}$. Выбор системы координат с соответствующими направляющими косинусами может быть произвольным и 9 компонент напряжений при этом соответственно будут различными. Однако, в нашем случае величины $\boldsymbol{m}$, $\boldsymbol{l}$, $\boldsymbol{n}$ должны быть такими, чтобы все компоненты касательных напряжений $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ (в силу симметрии) должны быть равными нулю. Это условие будет выполнено в том случае, если величина $\boldsymbol{\sigma}$ по $\boldsymbol{l}$ и $\boldsymbol{m}$ и дополнительным соотношениям равенства единицы суммы квадратов всех трех направляющих. Итак.

$$\frac{\partial\sigma}{\partial l} = 0 \quad \frac{\partial\sigma}{\partial m} = 0 \qquad l^2 + n^2 + m^2 = 1 \quad (3)$$

Значения $\boldsymbol{l}$, $\boldsymbol{m}$ и $\boldsymbol{n}$, определяют направления главных осей напряжения при этом составляется кубическое уравнение относительно $\boldsymbol{\sigma}$:

$$\sigma^3 - I_1\sigma^2 + I_2\sigma - I_3 = 0 \quad (4)$$

Инварианты $\boldsymbol{I_1}$, $\boldsymbol{I_2}$, $\boldsymbol{I_3}$ через главные напряжения выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ I_2 &= \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3\sigma_2 + \sigma_1\sigma_2 = \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x + \sigma_x\sigma_y - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2 \\ I_3 &= \sigma_1\sigma_2\sigma_3 = \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{yz}\cdot\tau_{xz}\tau_{xy} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

В механике сплошных сред и в механике горных пород напряжения $\boldsymbol{\sigma_1}$, $\boldsymbol{\sigma_2}$ и $\boldsymbol{\sigma_3}$ называются главными напряжениями. Их главным отличием от любых других сочетаний трех взаимно перпендикулярных напряжений является то, что все касательные напряжения равны нулю.

В общем случае расположение главных напряжений $\boldsymbol{\sigma_1}$, $\boldsymbol{\sigma_2}$, $\boldsymbol{\sigma_3}$ по числовым значениям в тензоре напряжений, строго говоря, не определено. Однако, включение в рассмотрение состояний среды параметра $\mu_\sigma = \dfrac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ позволяет существенно расширить возможности аналитического анализа механических свойств среды. Отличительной особенностью использования параметра Лоде (параметра Лоде-Надаи, параметра Надаи-Лоде) [3], при определении видов напряженных состояний среды в математических моделях механических свойств твердых тел является необходимость находиться в рамках алгебраического неравенства (6) *всегда*.

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \,. \quad (6)$$

Если же величина одного из напряжений нарушает алгебраическое неравенство, то следует перенумеровать действующие напряжения и изменить оси действующих напряжений и соответственно классифицировать вид напряженного состояния. При этом объемное напряженное состояние становится изменяющимся видом напряженного состояния и определять его надо как сложное нагружение. Согласно свойствам тензоров используем разделительный закон и запишем разделение любого тензора напряжений в объемном напряженном состоянии следующим образом:

$$\tau_\sigma = \begin{Vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{Vmatrix} = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \mu_\sigma \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}(1 - \mu_\sigma) \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{Vmatrix} + $$
$$+2\mu_\sigma \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{Vmatrix} \qquad (7)$$

Несколько другой вид разложения тензора напряжений, по нашему мнению, впервые был установлен Е.И. Шемякиным [4].

Представляет определенный научный интерес разложение тензора 3-го порядка главных напряжений для трех основных видов напряженных состояний (по классификации Надаи А. [3]):

- «обобщенное» сжатие ($\mu_\sigma = +1$)

$$T_H^{сж} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{Bmatrix}_{\sigma_1 = \sigma_2} \to \sigma_1 \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} + (\sigma_1 - \sigma_3) \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{Bmatrix}; \qquad (8)$$

- «обобщенный» сдвиг ($\mu_\sigma = 0$)

$$T_H^{сдв} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{Bmatrix}_{\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)} \to \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{Bmatrix}; \qquad (9)$$

- «обобщенное растяжение ($\mu_\sigma = -1$)

$$T_H^{p} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{Bmatrix}_{\sigma_2 = \sigma_3} \to \sigma_3 \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} + (\sigma_1 - \sigma_3) \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}. \qquad (10)$$

В заключении этого пункта можно сделать следующие выводы. Чисто аналитическими разработками показано, что для любого объемного наряженного состояния (при выполнении условия (6)) можно получить тензор главных напряжений. Любое объемное напряженное состояние можно представить в виде трех физически конкретных простых напряженных состояний. При этом параметр Надаи-Лоде всегда находится в пределах от -1 до +1, описывая любое объемное напряженное состояние. По числовым величинам μ_σ можно прогнозировать вид разрушения, что будет показано при анализе проведенных экспериментах на установках (УТНС).

Анализ выполненных экспериментов. В настоящее время развивается направление по использованию физико-механических характеристик, полученных в условиях, приближенных к реальным. Наиболее перспективным, отражающим состояние горного массива, является физическое моделирование с использованием установок трехосного неравнокомпонентного сжатия (УТНС). Из всех существующих УТНС, предназначенных для испытания горных пород, только установка, разработанная и используемая в ДонФТИАНУССР [5], позволяет создавать независимые напряжения по всем трем направлениям нагружения и при этом изменять по соответствующим направлениям и фиксировать перемещения, пересчитываемые в деформации ε_1, ε_2 и ε_3. Пределы регулирования нагрузок для призматических образцов с ребром до 50 мм составляют от 0,1 до 500 МПа.

В программе механических испытаний образцов углей марки «Т» из выбросоопасного угольного пласта «Бабаковский» шахты «Красный Октябрь» Донецкого бассейна, отобранных на горизонте 716 м, выполнялись девять серий опытов (3 серии с тремя различными величинами равномерного всестороннего сжатия и 3 серии с различными значениями μ_σ от -1 до +1 [6]. По замеренным величинам напряжений и деформаций по трем направлениям действие нагрузок получаем из прямых опытов сразу: механические характеристики ***G***, ***K***, ***ν***, ***E***, параметры вида напряженного и деформированного состояния μ_σ и μ_ε, энергетические показатели A_φ, A_0 (работа формоизменения и работа изменения объема) и предельные значения аккумулированных потенциальных энергий W_φ и W_0. Такой достаточно полный перечень показателей представляет собой в определенной степени физически представительную выборку для механической функции состояние образца угля на каждом интервале нагружения. Правда, на первом этапе испытания выбирается упругая механическая модель активного нагружения.

Согласно первой серии проводились механические испытания образцов углей в напряженном состоянии «обобщенного» растяжения с предварительным равномерным обжатием. На каждый вид испытания предусматривалось проведение пяти опытов на образцах кубической формы, линейные размеры которых менялись от 4,9 до 5,4 см.

В каждом из пяти опытов фиксировалось $\sigma_1 = \sigma_0$ (начальное обжатие). По осям x_2, x_3 увеличивались сжимающие нагрузки при условии $\sigma_2 = \sigma_3$. Ясно, что в этом случае $\mu_\sigma = -1$ (см. формулу 10) и вид напряженного состояния соответствовал «обобщенному» растяжению (10).

В таблице 1 приводятся данные изменения компонент напряжения по трем осям нагружения, а также величины $\sigma_{ср}$, $\sigma_{окт}$, III_σ, μ_σ [3]:

$$\sigma_{ср} = \frac{1}{3}\left(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3\right)$$

$$\sigma_{окт} = \frac{1}{3}\left(\sqrt{\left(\sigma_1 - \sigma_2\right)^2 + \left(\sigma_2 - \sigma_3\right)^2 + \left(\sigma_1 - \sigma_3\right)^2}\right) \qquad (11)$$

$$III_\sigma = \sigma_1\sigma_2\sigma_3 \qquad \mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

Таблица 1

Изменение величин компонент главных напряжений образцов угля марки «Т» при обобщенном растяжении **($\mu_\sigma = -1$, $\sigma_0 = -4{,}96$ МПа)**

№ п/п	$-\sigma_1$, МПа	$-\sigma_2$, МПа	$-\sigma_3$, МПа	$-\sigma_{ср}$	$\sigma_{окт}$, МПа	$-III_\sigma$	$-\mu_\sigma$
1	0,62	0,65	1,06	0,777	0,201	0,4272	0,86
2	3,97	4,16	4,23	4,12	0,110	69,86	0,46
3	4,96	5,20	5,29	5,15	0,139	136,44	0,45
4	4,96	10,4	10,6	8,65	2,614	546,79	0,93
5	4,96	20,8	21,2	15,65	8,133	2187,16	0,95
6	4,96	31,2	31,7	22,62	12,489	4905,64	0,96
7	4,96	41,6	42,3	29,62	17,440	8728,01	0,96
8	4,96	52,0	52,9	36,62	22,390	13643,97	0,96
9	4,96	62,4	63,5	43,62	27,329	19653,25	0,96
10	4,96	64,5	65,6	45,42	28,330	20986,75	0,96
11	4,96	66,6	67,7	46,42	29,320	22364,02	0,96
12	4,96	68,7	69,8	47,82	30,310	23784,35	0,96
13	4,96	70,8	72,0	49,25	31,323	25284,24	0,96

По существу в табл. 1 представлены данные заранее выбранной программы испытаний, т.е. сжимающих напряжений по всем трем осям. Первые два интервала в таблице 1 означают предварительное нагружение примерно до 5 МПа. Затем по осям x_2 и x_3 увеличивались по абсолютной величине два напряжения σ_2 и σ_3, причем при условии $\sigma_2 = \sigma_3$. В этом случае $\mu_\sigma = -1$ и вид напряженного соответствует «обобщенному» растяжению, т.е. сумме двух напряженных состояний равномерное всестороннее сжатие плюс одноосное растяжение. Этим напряжениям соответствуют деформации образца по трем осям. Однако, есть существенная разница по природе данных напряжений и данных деформаций, которые представлены в таблицах 1 и 2. Если программа испытаний по напряжениям выбиралась нами заранее для определенного вида нагружения, то величины деформаций получились в результате проведения опытов. Итак, в таблице 2 представлены величины деформаций по трем осям, девиаторы деформаций, $S_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{cp}$, параметр Надаи-Лоде для девиатора деформаций $\mu_\varepsilon = \dfrac{2S_2 - (S_1 + S_3)}{S_1 - S_3}$.

Научным результатом проведенных испытаний авторы публикации считают определения величин объемного модуля K и модуля сдвига G и соответствующих величин модуля деформации E и коэффициента Пуассона ν.

$$K = \frac{1}{3}\frac{\sigma_{cp}}{\varepsilon_{cp}};\quad G = \frac{\tau_{окт}}{\gamma_{окт}};\quad E = \frac{9KG}{3K+G};\quad \nu = \frac{3K-2G}{6K+2G} \qquad (12)$$

Таблица 2

Величина деформаций образца угля по трем осям нагружений при виде напряженного состояния «обобщенного» растяжения (σ_0 = -4,96 МПа, μ_0 = -1)

№ п/п	ε_1	$-\varepsilon_2$	$-\varepsilon_3$	$-\varepsilon_{cp}$	S_1	S_2	$-S_3$	μ_ε
1	-0	0	0	0	0	0	0	0
2	-0,19	0,258	0,503	0,260	0,070	+0,002	0,243	1,01
3	-0,266	0,378	0,584	0,409	0,143	+0,031	0,175	0,29
4	-0,247	0,457	0,785	0,496	0,249	+0,039	0,289	0,22
5	-0,228	0,577	0,986	0,597	0,369	+0,020	0,389	+0,45
6	-0,171	0,895	1,27	0,779	0,608	-0,116	0,491	-0,31
7	-0,057	1,27	1,71	1,012	0,955	-0,258	0,699	-0,47
8	-0,019	1,57	1,93	1,173	1,154	-0,397	0,757	-0,62
9	00,228	1,83	2,15	1,250	1,478	-0,580	0,900	-0,73
10	0,323	1,91	2,22	1,266	1,589	-0,644	0,954	-0,75
11	0,684	2,01	2,37	1,232	1,916	-0,778	1,138	-0,77
12	1,31	2,27	2,60	1,187	2,497	-1,083	1,413	-0,66
13	2,02	2,60	2,92	1,167	3,187	-1,433	1,753	-0,87

В табл. 3 представлены расчеты дополнительных механических характеристик функции состояния по формулам (12).

Таблица 3

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$-\sigma_{cp}$	0,776	4,116	5,15	8,65	15,65	22,62	29,62	36,62	43,62
$-\varepsilon_{cp}$	0	0,260	0,409	0,496	0,597	0,779	1,012	1,173	1,25
$\tau_{окт}$	0,20	0,110	0,139	2,61	8,125	12,48	17,42	22,4	27,3
$\gamma_{окт}$		0,235	0,262	0,442	0,618	0,911	1,397	1,657	2,105
K		1583	1259	1744	2621	2904	2927	3122	3490
G		46,8	53,5	590,5	1314,7	1369,6	1247	1350	1296,9
ν^*					0,18	0,29			

№ п/п	10	11	12	13
$-\sigma_{cp}$	45,02	46,42	47,82	49,25
$-\varepsilon_{cp}$	1,266	1,232	1,187	1,167
$\tau_{окт}$	28,3	29,3	30,3	31,3
$\gamma_{окт}$	2,263	2,723	3,538	4,5
K	3556	3784	4029	4220
G	1250	1076	856	695
ν^*	0,34		0,4	

* Числовые величины коэффициента Пуассона ν были получены выборочно

Отметим, что подобные механические испытания и числовые расчеты были выполнены и для других видов нагружений. Соответствующие пары начальных нагружений составляли $\boldsymbol{\sigma_0}$ и $\boldsymbol{\mu_\sigma}$ [6]. Значения механических характеристик $\boldsymbol{K}$ и $\boldsymbol{G}$ естественно не совпадали для различных видов напряженных состояний и для различных величин $\boldsymbol{\sigma_{cp}}$. Математические формулы для $\boldsymbol{K}$ и $\boldsymbol{G}$ как функции от $\boldsymbol{\sigma_{cp}}$ и $\boldsymbol{\mu_\sigma}$ представляем в виде :

$$K = \frac{1+\mu_\sigma}{2}\mu_\sigma K_{сж} + \frac{\mu_\sigma - 1}{2}\mu_\sigma K_p + \left(1-\mu_\sigma^2\right)K_{сдв}$$
$$G = \frac{1+\mu_\sigma}{2}\mu_\sigma G_{сж} + \frac{\mu_\sigma - 1}{2}\mu_\sigma G_p + \left(1-\mu_\sigma^2\right)G_p \qquad (13)$$

После того как определены величины $\boldsymbol{K}$ и $\boldsymbol{G}$, являющиеся механическими постоянными образца угля и описывающими его упругие свойства, можно составить линейную зависимость между деформациями и напряжениями. Если тензоры напряжений и деформаций разделить на шаровую и девиаторную части, то закон Гука записывается в простом виде [2]:

$$\sigma_{cp} = 3K\varepsilon_{cp}; \quad S_{ik} = 2G\ell_{ik}, \qquad (14)$$

где $S_{ik} = \sigma_{ik} - \frac{1}{3}\sigma_{cp}\delta_{ik}$, $\ell_{ik} = \varepsilon_{ik} - \frac{1}{3}\varepsilon_{cp}\delta_{ik}$; δ_{ik} – символ Кронекера (единичный шаровый тензор).

Эти зависимости можно преобразовать к виду:

$$\sigma_{ik} = \frac{E}{1+\nu}\left(\varepsilon_{ik} + \frac{\nu}{1-2\nu}\varepsilon_{cp}\delta_{ik}\right) \qquad (15)$$

Конечно считать, что зависимости (15), являющиеся математической моделью упругой среды подходят для всего интервала нагружения образцов угля и угольных пластов было бы неправильным. Можно сформулировать область использования зависимости (15) для неупругой упругой модели для активного нагружения, но не для разгрузки. Кроме того эти же зависимости можно использовать как начальные приближения для уточнения разрабатываемых механических моделей для такой сплошной среды как горная порода.

Образец угля, представляемый как твердое тело с нарушениями, деформировался и разрушался таким образом, что вплоть до разрушения тензоры девиаторы напряжения и деформации для «обобщенного» растяжения и «обобщенного» сдвига пропорциональны. Кроме того, виды разрушений также соответствовали видам нагружения [6, 7]. Пропорциональность сохранялась и для шаровых тензоров напряжения и деформации. Поэтому с достаточной степенью физической представительности можно считать что результаты проведенных механических испытаний образцов углей и использование математических характеристик и параметров позволяют записать выражения для энергии $\boldsymbol{W}$ нагружения образца угля

$$W = W_0 + W_\phi;$$

* Числовые величины коэффициента Пуассона $\boldsymbol{\nu}$ были получены выборочно

где $W_0 = \frac{K\varepsilon_{cp}^2}{2}$ – энергия изменения объема; $W_\varphi = \frac{3G\gamma_{окт}^2}{4}$ – энергия формоизменения, где $\gamma_{окт}$ – октаэдрическая деформация.

Полученные сведения о напряженно-деформированном состоянии среды на границе разрушения позволяют построить критерий прочности, описывающий предельное состояние образцов углей и горных массивов перед наступлением разрушения. Для проведения моделирования формирования зон «предельных» состояний пластов угля и полезного ископаемого вблизи выработок помимо статических (квази упругих) свойств среды необходимо детальное знание прочностных характеристик углей и горных пород, учитывающих влияние как вида напряженного состояния, так и вида равномерного всестороннего сжатия. В дальнейшем целесообразно учесть и влияние скорости деформирования, исследования по которым развиты в работах ВНИМИ [8], хотя оценка скоростей деформировния в массиве представляет сложную задачу.

В заключение, приведем математическую модель энергетического критерия прочности. Формула этого критерия имеет такую зависимость:

$$A_\phi \le -\frac{1-\mu_\sigma}{2}\mu_\sigma W_\phi^{сж} + \frac{1+\mu_\sigma}{2}\mu_\sigma W_\phi^{раст} + \left(1-\mu_\sigma^2\right)W_\phi^{сдв} \quad (17)$$

где W_0, W_ϕ – работы сил изменения объема и формоизменения. Функции W_0, W_ϕ зависят от работы сил при начальном равномерном всестороннем обжатии и от вида объемного напряженного состояния. Нижний индекс у показателей W_0, W_ϕ показывает форму объемного нагружения сдвигом или равномерным обжатием. Верхний индекс показывает «форму» обобщенного напряженного состояния. A_ϕ – представляет собой работу сил при формоизменении.

Разработанный энергетический критерий прочности углей учитывает отдельные физические положения теории разрушения и механики сплошных сред. Критерий учитывает потерю прочности при трех основных видах нагружения в объемном напряженном состоянии и при действии всестороннего равномерного сжатия. Включение в критерий физического параметра μ_σ позволило установить соответствие между видами нагружения и видами разрушения, что является физически значимым результатом. Определяемые экспериментальным путем зависимости функции состояния основных физических и механических характеристик устанавливают соответствие между видами нагружения и видами разрушения, что является физически значимым результатом. Зависимости функции состояния основных физических и механических характеристик пород массива и угольного пласта дают возможность уточнять влияние физических неоднородностей при развитой трещиноватости углей и горных пород с помощью математического моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М.* – Основы геомеханики. М., Недра, 1986, с. 299.

2. *Снеддон И.Н., Барри Д.С.* – Классическая теория упругости. М.: ГИФМЛ., 1961, с. 219

3. *Надаи А.* Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Мир., 1969, I. 648 с

4. *Шемякин Е.И.* Две задачи механики горных пород, связанные с освоением глубоких месторождений руды и угля. – Новосибирск, ФТПРПИ, 1975, №6 с. 29–45.

5. *А.с. 394692 СССР.* Установка для испытания призматических образцов на трехосное сжатие. А.Д. Алексеев, Е.Н. Осыка, А.Л. Тодосейчук – Опуб. в Б.И. – 1973. – 34 – 139 с.

6. *Алексеев А.Д., Норель Б.К., Стариков Г.П.* Механические испытания образцов угля на установке трехосного сжатия ФТРПИ 1983, 1, 106–109.

7. *Норель Б.К.* Изменение механической прочности угольного пласта в массиве: М., Наука, 1983, 127 с.

8. *Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г.* – Механика деформирования и разрушения горных пород: М. Недра, 1992, 224 с. ГИАБ

Коротко об авторах

Демин А.М. – профессор, главный научный сотрудник,
Всесоюзный научно-исследовательский институт технической информации
Норель Б.К. – профессор, доктор технических наук, главный научный сотрудник,
Чирков С.Е. – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,
Лиманский Д.В. – старший научный сотрудник,
Институт горного дела им. А.А. Скочинского, E-mail: igd@igds.ru

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ГТУ)			
МАСКОВ Сергей Петрович	Повышение эффективности и безопасности электровзрывания при производстве массовых взрывов на рудниках	25.00.22 05.26.03	к.т.н.
ТРОЦЕНКО Оксана Александровна	Повышение эффективности и безопасности пневматического заряжания скважин россыпными взрывчатыми веществами при подземной добыче руд	25.00.22 05.26.22	к.т.н.