

УДК 622.831.3

С.П. Минеев¹, д-р техн. наук, проф.,
С.Н. Федотов², канд. техн. наук,
О.В. Витушко³, канд. техн. наук

1 – Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина,
e-mail: sergmineev@gmail.com

2 – Институт прикладной математики и механики НАН Украины, г. Донецк, Украина

3 – Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, г. Днепропетровск, Украина

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА НА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА

S.P. Mineyev¹, Dr. Sc. (Tech.), Professor,
S.N. Fedotov, Cand. Sc. (Tech.),
O.V. Vitushko³, Cand. Sc. (Tech.)

1 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: sergmineev@gmail.com

2 – Institute of Applied Mathematics and Mechanics of National Academy of Sciences of Ukraine, Donetsk, Ukraine

3 – Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipropetrovsk, Ukraine

ESTIMATION OF INFLUENCE OF HETEROGENEITY OF COAL LAYER STRENGTH PROPERTIES ON REDISTRIBUTION OF THE PRESSURE-DEFORMED CONDITION OF COAL MASSIF

Рассмотрено влияние неоднородности угольного пласта по прочности на изменение напряженно-деформированного состояния анизотропного горного массива, имеющее место при ведении горных работ в зонах геологических нарушений. Исследование влияния неоднородности пласта выполнено на основе решения задачи теории упругости. Оценка показывает существенное повышение газодинамической опасности при ведении горных работ в зонах сингенетических нарушений.

Ключевые слова: выбросоопасность, горный массив, напряженно-деформированное состояние, угольный пласт, скачкообразное изменение свойств, пластическая зона, газодинамическая опасность

Ведение горных работ на выбросоопасных угольных пластах в зонах геологических нарушений относят к особо сложным условиям [1]. В подобных условиях происходит большое количество газодинамических явлений, в том числе с тяжелыми последствиями. Одним из типов геологических нарушений являются неразрывные, в которых имеет место пониженная прочность и значительная препарация угля, а, кроме того, особенно выбросоопасные пласты характеризуются увеличенной изменчивостью прочности угля [2]. При ведении горных работ на выбросоопасных угольных пластах в зонах геологических нарушений при обосновании конкретного способа снижения выбросоопасности большой интерес представляет картина перераспределения напряжений в горном массиве, когда забой приближается к участку угля, механические характеристики которого скачкообразно изменяются. Поэтому авторы попытались произвести оценку влияния резкого изменения прочностных свойств угля в призабойной зоне пласта на перераспределение напряженно-деформированного состояния горного массива. Планируемую оценку было решено произвести на основе решения плоской задачи теории упругости по исследованию влияния неоднородности угольного пласта на напряженно-

деформированное состояние анизотропного массива горных пород.

Ранее в ряде работ были выполнены исследования влияния изменения параметров угольного пласта на напряженно-деформированное состояние массива горных пород [3–5]. С учетом отмеченного, для выполнения необходимых расчетов была решена задача в следующей постановке.

Представим схему обработки исследуемого нами угольного пласта в следующем виде (рис. 1). На схеме представим угольный пласт мощностью $2h$, расположенный на глубине H от дневной поверхности. Угол падения пласта будет обозначен через α . Угол ψ фиксирует положение плоскостей изотропии горных пород. Будем считать, что угольный пласт на участках $(-x_2^l, -x_p^l)$, (x_p^r, x_2^r) , $(-x_p^l, -x_1)$, (x_1, x_p^r) деформируется в соответствии со своими пластическими свойствами [6, 7]. Координаты границ исследуемых нами пластических областей в призабойной части пласта $-x_2^l$, x_2^r соответственно являются неизвестными.

Естественное состояние массива вызвано его собственным весом и в системе координат xOy описывается формулами, приведенными ранее в работе [5].

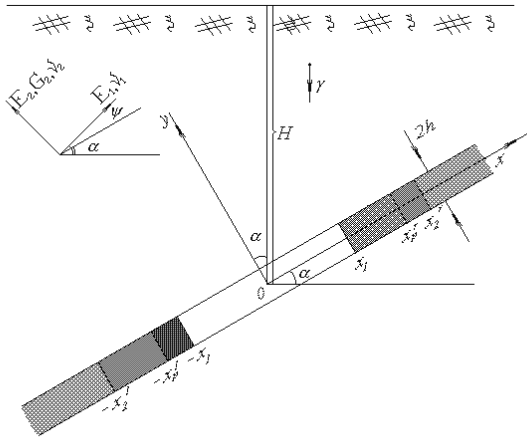


Рис. 1. Расчетная схема для оценки напряженно-деформированного состояния при разработке наклонного угольного пласта

Для определения дополнительных напряжений и перемещений в массиве воспользуемся методом суперпозиции и сформулируем две группы смешанных граничных условий. Условия, относящиеся к первой группе, связаны с нормальным деформированием массива пород кровли. Они будут иметь вид

$$\begin{aligned} \sigma_y &= m\gamma H \left(1 - \frac{\sin \alpha}{H} x\right) - (a_l x + c_l); & -x_2^l < x < -x_p^l; \\ \sigma_y &= m\gamma H \left(1 - \frac{\sin \alpha}{H} x\right) - (n_l x + m_l); & -x_p^l < x < -x_1; \\ \sigma_y &= m\gamma H \left(1 - \frac{\sin \alpha}{H} x\right); & -x_1 < x < x_1; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sigma_y = m\gamma H \left(1 - \frac{\sin \alpha}{H} x\right) - (n_r x + m_r); \quad x_1 < x < x_p^r;$$

$$\sigma_y = m\gamma H \left(1 - \frac{\sin \alpha}{H} x\right) - (a_r x + c_r); \quad x_p^r < x < x_2^r;$$

$$\tau_{xy} = 0; \quad |x| < \infty; \quad v = h; \quad x \in (-\infty, -x_2^l) \cup (x_2^r, +\infty).$$

В них $n_l = -\frac{T_n^l}{h} \cdot \frac{1-K(T_n^l, -x_p^l)}{2}$; $n_r = \frac{T_n^r}{h} \cdot \frac{1-K(T_n^r, x_p^r)}{2}$;

$$a_l = -\frac{T_n}{h} \cdot \frac{1-K(T_n, -x_p^l)}{2}; \quad a_r = \frac{T_n}{h} \cdot \frac{1-K(T_n, x_p^r)}{2};$$

$$K(T, x) = \frac{2|\tau_{xy}^\circ(x, 0)|}{T} - 1;$$

$$m_l = C(T_n^l, c_p^l, K(T_n^l, -x_p^l)) + n_l x_1;$$

$$m_r = C(T_n^r, c_p^r, K(T_n^r, x_p^r)) - n_r x_1;$$

$$c_l = -n_l(x_p^l - x_1) + C(T_n, c_p, K(T_n, -x_p^l)) + a_l x_p^l;$$

$$c_r = n_r(x_p^r - x_1) + C(T_n, c_p, K(T_n, x_p^r)) - a_r x_p^r;$$

$$C(T_n, c_p, K_p) = T_n \frac{\sqrt{1-c_p}}{1-K_p} \left(\frac{\pi}{2} - \kappa_p \sqrt{1-\kappa_p^2} - \arcsin \kappa_p \right),$$

где T_n, T_n^l, T_n^r – пределы текучести при сдвиге в плоскости xOy для угля исследуемого пласта; c_p, c_p^l, c_p^r – параметры пластической анизотропии пласта, величины которых изменяются в интервале $(-\infty, 1)$ [7]. T_n и c_p для угольного пласта $(-\infty, -x_2^l) \cup (x_2^r, +\infty)$, T_n^l и c_p^l для участка пласта $(-x_p^l, -x_1)$, T_n^r и c_p^r для участка (x_p^r, x_2^r) .

Решение смешанной задачи (1), которое исчезает на бесконечности, находится с помощью формул Келдыша-Седова [8] и, соответственно, имеет вид

$$\Phi^{(i)}(z_i) = \frac{\mu_2}{\mu_2 - \mu_4} F(z_i); \quad \Psi^{(i)}(z_i) = -\frac{\mu_4}{\mu_2 - \mu_4} F(z_i), \quad (2)$$

где $z_i = x + \mu_i y$, $(i = 1, 2)$; μ_i – корни характеристического уравнения; $F(z)$ – функция, записываемая следующим образом

$$\begin{aligned} F(z) &= \frac{\gamma H m}{2} \left(1 - \frac{\sin \alpha}{H} \left(z - \sqrt{(z+x_2^l)(z-x_2^r)}\right)\right) + \\ &+ [a_l \vartheta(-x_2^l, -x_p^l) + a_r \vartheta(x_p^r, x_2^r)] \frac{\sqrt{(z+x_2^l)(z-x_2^r)}}{\pi} + \\ &+ \frac{a_l z + c_l}{2\pi i} \ln \frac{\chi(z, -x_p^l)}{\chi(z, -x_2^l)} - \frac{a_r z + c_r}{2\pi i} \ln \frac{\chi(z, x_p^r)}{\chi(z, x_2^r)} + \quad (3) \\ &+ [n_l \vartheta(-x_p^l, -x_1) + n_r \vartheta(x_1, x_p^r)] \frac{\sqrt{(z+x_2^l)(z-x_2^r)}}{\pi} + \\ &+ \frac{n_l z + m_l}{2\pi i} \ln \frac{\chi(z, -x_1)}{\chi(z, -x_p^l)} - \frac{n_r z + m_r}{2\pi i} \ln \frac{\chi(z, x_1)}{\chi(z, x_p^r)}; \end{aligned}$$

$$\vartheta(t_1, t_2) = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2^r - t_1}{x_2^l + t_1}} - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2^r - t_2}{x_2^l + t_2}};$$

$$\chi(z, x) = \frac{-2i\sqrt{(z+x_2^l)(z-x_2^r)}\sqrt{(x_2^l+x)(x_2^r-x)} + (x_2^r-x_2^l)(z+x) - 2(zx-x_2^l x_2^r)}{(x_2^r+x_2^l)(x-z)}.$$

Вполне очевидно, что решение (3) должно быть ограничено в точках $-x_2^l$ и x_2^r .

Условие локального влияния выработки на напряженное состояние горного массива может быть представлено в виде [5]

$$\begin{aligned} &\frac{\gamma H m}{2} \left(1 + \frac{\sin \alpha}{2H} (x_2^l - x_2^r)\right) + \\ &+ \frac{1}{2\pi} \{a_l \zeta(-x_p^l, -x_2^l) - a_r \zeta(x_p^r, x_2^r)\} + \quad (4) \\ &+ n_l \zeta(-x_1, -x_p^l) - n_r \zeta(x_1, x_p^r) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -[a_l(x_2^r - x_2^l) + 2c_l] \vartheta(-x_2^l, -x_2^r) - \\
 & -[a_r(x_2^r - x_2^l) + 2c_r] \vartheta(x_2^r, x_2^l) - \\
 & -[n_l(x_2^r - x_2^l) + 2m_l] \vartheta(-x_2^l, -x_1) - \\
 & -[n_r(x_2^r - x_2^l) + 2m_r] \vartheta(x_1, x_2^r) \} = 0;
 \end{aligned}$$

$$\zeta(t_1, t_2) = \sqrt{(x_2^l + t_1)(x_2^r - t_1)} - \sqrt{(x_2^l + t_2)(x_2^r - t_2)}.$$

Из условий для перемещений может быть получено еще одно трансцендентное соотношение

$$\begin{aligned}
 & M(a_l, c_l, -x_2^l, -x_2^r) + M(a_r, c_r, x_2^r, x_2^l) + \\
 & + M(n_l, m_l, -x_1, -x_2^l) + M(n_r, m_r, x_2^r, x_1) + \\
 & + \left[\frac{\gamma H \sin \alpha}{2} \pi + a_l \vartheta(-x_2^l, -x_2^r) + a_r \vartheta(x_2^r, x_2^l) + \frac{(x_2^r + x_2^l)^2}{8} \right] = 0; \\
 & M(A, B, t_1, t_2) = -\left(\frac{A}{4}(2t_1 - x_2^l + x_2^r) + B \right) \frac{\sqrt{(x_2^l + t_1)(x_2^r - t_1)}}{2} + \\
 & + \left(\frac{A}{4}(2t_2 - x_2^l + x_2^r) + B \right) \frac{\sqrt{(x_2^l + t_2)(x_2^r - t_2)}}{2}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Из системы уравнений (4 – 5) могут быть определены неизвестные нам размеры (длины) призабойных пластических областей $(-x_2^l, -x_1)$, (x_1, x_2^r) , соответственно, в зависимости от исходного горного давления, пластических свойств угля, протяженности свободно зависающих пород кровли, длин зон с измененными пластическими свойствами, а также глубины залегания, мощности и угла наклона разрабатываемого угольного пласта.

Вторая группа граничных условий связана с поперечным деформированием пород кровли и может быть записана следующим образом

$$\begin{aligned}
 & \sigma_y = 0; \quad |x| < \infty; \\
 & \tau_{xy} = \gamma H \left(1 - \frac{\sin \alpha}{H} x \right); \quad -x_2^l < x < x_2^r; \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$u = 0; \quad -\infty < x < -x_2^l, \quad x_2^r < x < \infty.$$

При необходимости в дальнейшем учета влияния параметров пород почвы, отметим, что для них условия (6) являются корректными и полностью сохраняются.

Тогда решение смешанной задачи (6), как уже отмечалось, исчезающее на бесконечности, имеет вид

$$\begin{aligned}
 \Phi^{(2)}(z_1) &= \frac{\gamma H}{2} \frac{l}{\mu_2 - \mu_1} \left\{ \left(1 - \frac{\sin \alpha}{H} z_1 \right) \left(1 - \frac{2z_1 + x_2^l - x_2^r}{2\sqrt{(z_1 + x_2^l)(z_1 - x_2^r)}} \right) - \right. \\
 & \left. - \frac{\sin \alpha (x_2^l + x_2^r)^2}{8H\sqrt{(z_1 + x_2^l)(z_1 - x_2^r)}} \right\}; \quad (7) \\
 \Psi^{(2)}(z_2) &= -\Phi^{(2)}(z_2).
 \end{aligned}$$

При этом напряженно-деформированное состояние горного массива, при решении рассматриваемой нами задачи, будет описываться следующими функциями

$$\begin{aligned}
 \Phi(z_1) &= \Phi^{(1)}(z_1) + \Phi^{(2)}(z_1); \\
 \Psi(z_2) &= \Psi^{(1)}(z_2) + \Psi^{(2)}(z_2). \quad (8)
 \end{aligned}$$

Расчеты системы трансцендентных уравнений (4) и (5) выполнены с помощью программных комплексов Borland C++ и Matlab. Результаты численных расчетов приведены в таблице 1 и 2, позволяют нам оценить влияние угла наклона пласта и изменения пластических свойств угля на протяженность в призабойной зоне участков $(x_2^l - x_1)$ и $(x_2^r - x_1)$. Численные расчеты выполнены при следующих значениях параметров: $\lambda = 0,9$; $\psi = 0^\circ$; $2h = 1$ м; $T_n = 2,55$ МПа; $c_p = 0$. Для получения данных в табл. 1 дополнительно использовались следующие характеристики: $x_1 = 30$ м, $x_p^l = 40$ м, $x_p^r = 35$ м, а для данных, приведенных в табл. 2: $H = 1000$ м, $\alpha = 45^\circ$, $T_n^l > T_n$, $T_n^r < T_n$.

Таблица 1

Размеры зон пластических деформаций при разных пределах текучести (T_n^l, T_n^r) и анизотропии (c_p^l, c_p^r)

T _n ^l , c _p ^l ----- T _n ^r , c _p ^r	H, м	(x ₂ ^l - x ₁), м							(x ₂ ^r - x ₁), м						
		α													
		-60°	-45°	-30°	0°	30°	45°	60°	-60°	-45°	-30°	0°	30°	45°	60°
2,55;0 -----	800	13,93	15,19	14,72	11,35	15,27	16,09	14,82	14,82	16,09	15,27	11,35	14,72	15,19	13,93
	1000	18,57	20,92	19,64	13,52	20,37	22,21	19,77	19,77	22,21	20,37	13,52	19,64	20,92	18,57
2,55;0	1200	24,49	28,93	25,94	15,60	26,96	30,96	26,17	26,17	30,96	26,96	15,60	25,94	28,93	24,49
	800	14,21	15,53	15,01	11,48	15,54	16,40	15,08	20,03	21,83	20,39	14,42	19,56	20,41	18,65
2,55;0 -----	1000	19,00	21,46	20,07	13,67	20,78	22,70	20,15	26,02	29,42	26,49	16,66	25,37	27,33	24,15
	1200	25,13	29,81	26,58	15,77	27,57	31,75	26,74	33,85	40,42	34,45	18,79	32,85	37,09	31,19
5,1;-10 -----	800	5,00	6,92	6,99	5,90	7,35	7,47	6,78	14,46	15,67	14,88	11,13	14,32	14,75	13,54
	1000	9,92	11,18	10,86	8,26	11,30	11,90	10,63	19,23	21,55	19,80	13,25	19,05	20,22	18,00
2,55;0	1200	14,24	16,67	15,49	10,35	16,12	17,80	15,24	25,38	29,91	26,13	15,29	25,08	27,83	23,65
	800	6,54	7,33	7,34	6,08	7,66	7,82	7,09	19,68	21,42	20,02	14,20	19,17	19,97	18,27
5,1;-10 -----	1000	10,38	11,76	11,33	8,43	11,74	12,43	11,04	25,49	28,78	25,94	16,40	24,80	26,67	23,60
	1200	14,92	17,60	16,18	10,53	16,76	18,65	15,85	33,09	39,42	33,65	18,50	32,03	36,05	30,40

Из таблицы 1 видно, что уменьшение прочности угля в исследуемой зоне горного массива приводит к увеличению длины пластической зоны. И наоборот, при приближении забоя выработки к участку угольного массива с большей прочностью, протяженность призабойной пластической зоны резко сокращается. Данные, приведенные в таблице 2, показывают некоторое изменение длин зон пластических деформаций $(x_2^l - x_1)$ и $(x_2^r - x_1)$ в зависимости от протяженностей участков $(x_p^l - x_1)$, $(x_p^r - x_1)$ для случая, когда $T_n^l > T_n$, а

$T_n^r < T_n$, т.е. максимум величины предела текучести находится в зоне x_2^l . Из результатов расчетов видно, что с ростом длины участка $(x_p^r - x_1)$, либо при уменьшении протяженности области $(x_p^l - x_1)$, происходит увеличение зон пластических деформаций. Причем, наблюдается значительное изменение длин пластических зон в призабойных областях пласта, в которых происходят скачкообразные изменения физико-механических свойств угля.

Таблица 2

Размеры зон пластических деформаций вблизи забоя

$x_p^l, \text{ м}$	$(x_2^l - x_1), \text{ м}$						$(x_2^r - x_1), \text{ м}$					
							$x_p^r, \text{ м}$					
	30	32	34	36	38	40	30	32	34	36	38	40
30	22,21	22,33	22,43	22,53	22,62	22,70	20,92	22,25	23,56	24,84	26,10	27,33
31	19,88	19,99	20,10	20,20	20,29	20,38	20,71	22,05	23,36	24,64	25,90	27,14
32	17,66	17,78	17,89	17,99	18,09	18,17	20,54	21,88	23,19	24,48	25,74	26,97
33	15,58	15,70	15,81	15,92	16,01	16,10	20,41	21,75	23,06	24,35	25,61	26,84
34	13,66	13,78	13,89	14,00	14,09	14,18	20,30	21,64	22,95	24,24	25,50	26,74
35	11,90	12,02	12,14	12,24	12,34	12,43	20,22	21,56	22,88	24,17	25,43	26,67

Результаты расчетов по оценке влияния неоднородности прочностных свойств угольного пласта на перераспределение напряженно-деформированного состояния горного массива приведены в виде графиков на рис. 2–6. Так, на рис. 2–6 приведены изолинии $\sigma_y^e / \gamma H = \text{const}$ в окрестности выработанного пространства при $H = 1000 \text{ м}$, $2h = 1 \text{ м}$, $x_1 = 30 \text{ м}$, $\lambda = 0,9$, $\psi = 0^\circ$, $\alpha = \pm 45^\circ$, $c_p = 0$, $T_n = 2,55 \text{ МПа}$. На рис. 2 представлены изобары для наклонного ($\alpha = 45^\circ$) однородного угольного пласта.

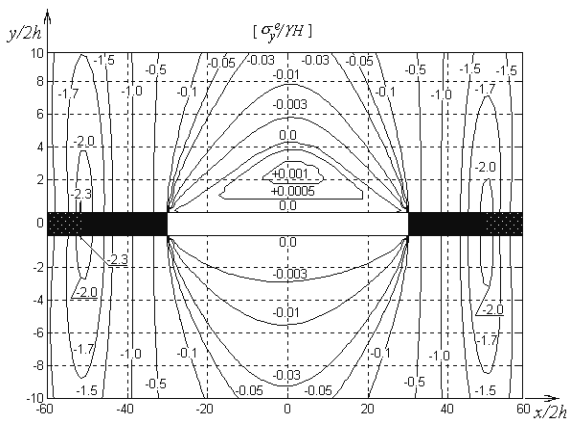


Рис. 2. Изолинии постоянных значений напряжений ($\sigma_y^e / \gamma H = \text{const}$) вблизи выработанного пространства при $\alpha = 45^\circ$

При уменьшении предела текучести на сдвиг в одной из зон пластических деформаций (рис. 3 и 4) происходит уменьшение максимальных сжимающих

напряжений в породах над пластом и удаление их от забоя вглубь массива. При этом в другой пластической зоне максимальные сжимающие напряжения увеличиваются в результате перераспределения опорного давления, а в области свободно зависящих породах кровли наблюдается рост растягивающих напряжений.

При увеличении предела текучести на сдвиг в одной из пластических зон угольного пласта (рис. 5) происходит рост концентрации напряжений в краевой части пласта, а максимальные растягивающие напряжения над выработанным пространством уменьшаются.

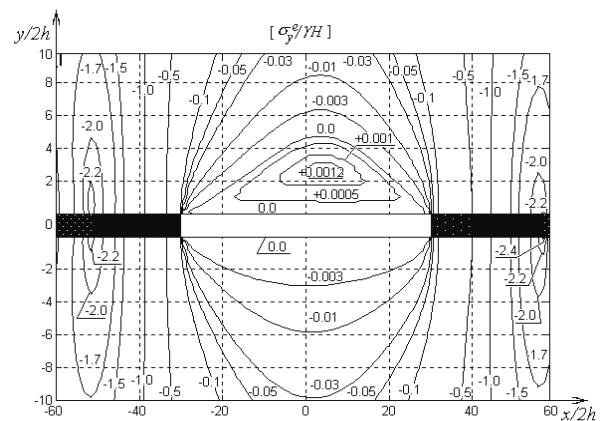


Рис. 3. Изолинии постоянных значений напряжений ($\sigma_y^e / \gamma H = \text{const}$) вблизи выработанного пространства при $\alpha = 45^\circ$, $x_{pl} = 30 \text{ м}$, $x_{pr} = 40 \text{ м}$, $T_{nl} = 0$, $c_{pl} = 0$, $T_{nr} = 1,7 \text{ МПа}$, $c_{pr} = 0,9$

Bulat A.F. Stress-deformed state of anisotropic rock massif when mining coal seams / Bulat A.F., Vitushko O.V., Goman O.G. – Dnepropetrovsk: Poligrafist, 2000. – 216 с.

5. *Минеев С.П.* Оценка влияния изменения мощности угольного пласта на напряженно-деформированное состояние призабойной части горного массива / Минеев С.П., Федотов С.Н., Витушко О.Н. // Научный вестник НГУ. – № 9–10, 2010.

Mineyev S.P. Estimation of influence of coal seam thickness variation on stress-deformed state of face space in rock massif / Mineyev S.P., Fedotov S.N., Vitushko O.N. // Naukovyi visnyk NGU. – No.9–10, 2010

6. *Качанов Л.М.* Основы теории пластичности / Качанов Л.М. – 2-е изд. – М.: Наука, 1969. – 420 с.

Kachanov L.M. Fundamentals of plasticity theory / Kachanov L.M. – 2 edition. – М.: Nauka, 1969. – 420 p.

7. *Хилл Р.* Математическая теория пластичности / Хилл Р. – М.: Изд-во техн.-теорет. Лит., 1956. – 407 с.

Khill R. Mathematical theory of plasticity / Khill R. – М.: Izd-vo tekhn.-teoret. Lit., 1956. – 407 p.

8. *Мусхелишвили Н.И.* Сингулярные интегральные уравнения / Мусхелишвили Н.И. – М.: Наука, 1968. – 512 с.

Muskheshvili N.I. Singular integral equation / Muskeshvili N.I. – М.: Nauka, 1968. – 512 p.

Розглянуто вплив неоднорідності вугільного пласта з міцності на зміну напружено-деформованого стану анізотропного гірського масиву, що має місце при веденні гірських робіт у зонах геологічних порушень. Дослідження впливу неоднорідності пласта виконане на основі рішення задачі теорії пружності. Оцінка показує істотне підвищення газодинамічної небезпеки при веденні гірських робіт у зонах сингенетичних порушень.

Ключові слова: *викидонебезпечність, гірський масив, напружено-деформований стан, вугільний пласт, стрибкоподібна зміна властивостей, пластична зона, газодинамічна небезпека*

Influence of heterogeneity of coal layer durability on change of press-deformed condition of the anisotropic coal massif occurring during conduction of mining works in zones of geological faults is considered. Research of influence of heterogeneity of a layer on the basis of the decision of a problem of the theory of elasticity is carried out. Estimation shows essential increase of gas-dynamical danger when conducting mountain works in zones syngenetic faults is shown.

Keywords: *outburst hazard, coal massif, pressure-deformed condition, coal layer, stepwise change of properties, plastic zone, gas-dynamical danger*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук О.В. Солодянкіним. Дата надходження рукопису 08.11.10