

УДК 622.25:502.5

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО И ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА

Рубан А. Д., Захаров В. Н.
(УРАН ИПКОН РАН, г. Москва, Россия)

Наведено результати аналітичних і експериментальних досліджень напружено-деформованого стану масиву гірських порід при техногенному впливі. Встановлено критерійні умови виникнення газодинамічних явищ при очисних і прохідницьких роботах. Сформовано структуру автоматизованої системи моніторингу небезпеки газо- і геодинамічних явищ у шахтах.

Herewith are presented the results of the analytic and experimental studies on stressed-deformed state of the rock mass under technological impact; established the criteria frameworks for the avalanche destruction risk of the rock mass under circumstances aforesaid; provided the structure for the computer-aided system supposed for the gas-and geodynamic effects monitoring within mines.

Установлено, что основное условие формирования в массиве горных пород очагов, потенциально опасных по газо- и геодинамическим явлениям (ГДЯ и ГЯ), заключается в создании природно-техногенных условий для проявления в призабойной зоне массива эффекта накопления и быстрого сброса (высвобождения) критических значений геознергии.

1. Напряженно-деформированное и газодинамическое состояние приконтурной части угольного пласта. Диапазоны изменения параметров напряженного состояния призабойной зоны угольных пластов в опасных и неопасных зонах по экспериментальным данным представлены в таблице 1.

Таблица 1

Диапазоны изменения параметров напряженного состояния
 призабойной зоны угольных пластов

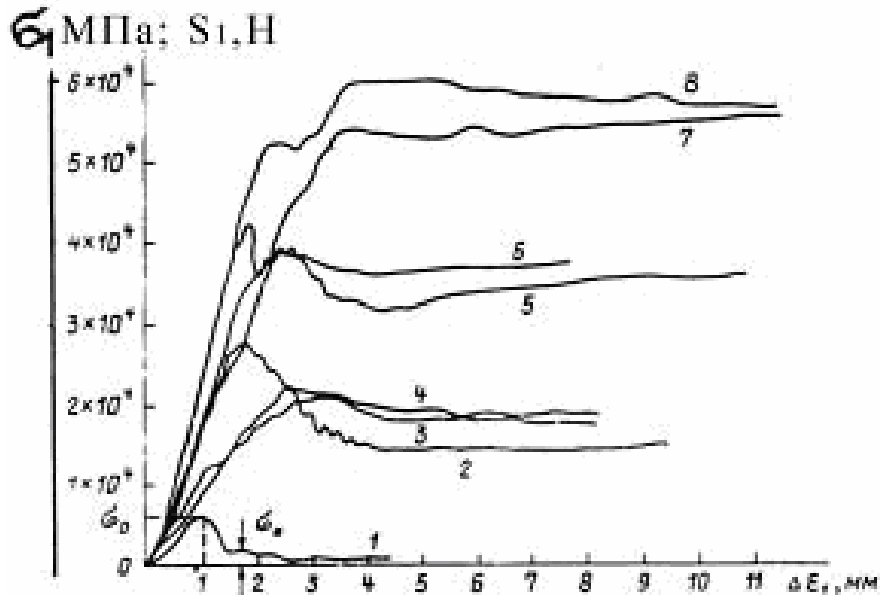
Зона/параметры	$K=\sigma_{\max}/\sigma_0$	$l_k(m=1-2 \text{ м})$	Grad σ
Опасная	1,8-4,7	1-3	1,2-2,5
Неопасная	1,2-1,5	4-9	0,3-0,8

Здесь l_k , $K=\sigma_{\max}/\sigma_0$, $\text{grad } \sigma = \sigma_{\max}/\sigma_0$, l_k – длина области спада напряжений, коэффициент напряжений и градиент концентрации напряжений в краевой части пластов, соответственно. Оценочные расчеты по формуле ($\sigma_{\text{ср}}$ – средние напряжения в пласте, E – модуль упругости угля) показывают, что упругая энергия в опасных зонах соответственно возрастает в 3-10 раз.

Эффект задержки деформаций и возрастания концентрации напряжений в призабойной части массива чаще всего наблюдается при ведении горных работ в зоне мелкоамплитудных нарушений, из-за изменения вида напряженного состояния, характеризуемого соотношением C главных напряжений: σ_1 – максимального и σ_3 – минимального $C=\sigma_3/\sigma_1$. Увеличение σ_3 вследствие затрудненного деформирования пласта в сторону забоя резко увеличивает прочность угля и формирует зоны повышенного горного давления (ПГД).

Исследование критериев прочности и процессов разрушения углей при формировании выбросоопасной и удароопасной ситуации выполнено в условиях объемного неравнокомпонентного напряженного состояния ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$), моделирующих призабойную зону массива. При высоких значениях бокового сжатия - $\sigma_3 > 13 \div 18$ МПа (кривые 7-8 на рис. 1) предельные кривые деформирования становятся горизонтальными (модуль спада $\mu \approx 0$), а предел прочности $\sigma_{1\max}$ и остаточная прочность σ_* совпадают. В этом случае разрушение происходит практически только путем сдвига - $\sigma_* = \tau_\theta = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$. При относительно невысоком уровне бокового сжатия $\sigma_3 < 5 \div 7$ МПа, (кривые 2-6, рис. 1) предельные кривые имеют хорошо выраженную ветвь спада напряжений σ_1 , предел прочности существенно превышает остаточную проч-

ность, а разрушение носит хрупко-пластичный характер, преимущественно путем отрыва.



Цифрами указаны значения σ_3 и P :

1. - $\sigma_3 = 0$; $P = 0$; 2. - $\sigma_3 = 5,0$; $P = 3,0$; 3. - $\sigma_3 = 4,0$; $P = 2,0$;
4. - $\sigma_3 = 4,0$; $P = 2,0$; 5. - $\sigma_3 = 9,0$; $P = 2,0$; 6. - $\sigma_3 = 7,0$; $P = 0$;
7. - $\sigma_3 = 13,0$; $P = 0$; 8. - $\sigma_3 = 15,0$; $P = 2$.

Рис. 1. Полные диаграммы «напряжения (осевая нагрузка) – деформация» $\sigma_1(S) - \varepsilon$ при различном боковом сжатии ($\sigma_3 = 0-15,0$ МПа) и насыщении метаном при давлении ($P = 0-3$ МПа) для угля II – III степени тектонической нарушенности

Таким образом, определено условие разрушения углей в объемном напряженном состоянии - $\sigma_3/\sigma_1 = C \leq 0,35$. При $C > 0,35$ разрушение не происходит и возможен процесс роста концентрации напряжений. При насыщении угля метаном под давлением $P = 1 \div 3$ МПа (кривые 2 - 5, 8, рис. 1) и сохранении давления газа в процессе эксперимента характер разрушения несколько изменяется, величина критерия снижается до $\sigma'_3/\sigma'_1 = C \leq 0,30$, где σ'_3 и σ'_1 – так называемые «эффективные» напряжения, учитывающие трещинно-поровое давление газа.

Експериментально встановлено, що критеріальними умовами, визначаючими можливість виникнення лавинного руйнування, є наступні:

– запас реалізуваної удільної потенціальної геоенергії (пружної енергії стиснення вугля при горних ударах і сумми пружної енергії стиснення і енергії виділяючогося газу при раптових вибухах вугля і газу) повинен бути вище 2-3 МДж/м³.

– характерна швидкість скидання бічного напруження не повинна бути нижче 1-3 МПа/с.

При дослідженні термодинамічних умов руйнування газонасиченого вугля в призабойній зоні вугільного пласта осеві навантаження на зразок σ_1 створювалися незалежно від бічного навантаження σ_3 . Реєструвалися діаграми осеві навантаження – осеві деформації, а також бічне напруження $\sigma_2 = \sigma_3$, тиск газу P і зміна температури зразка (рис. 2).

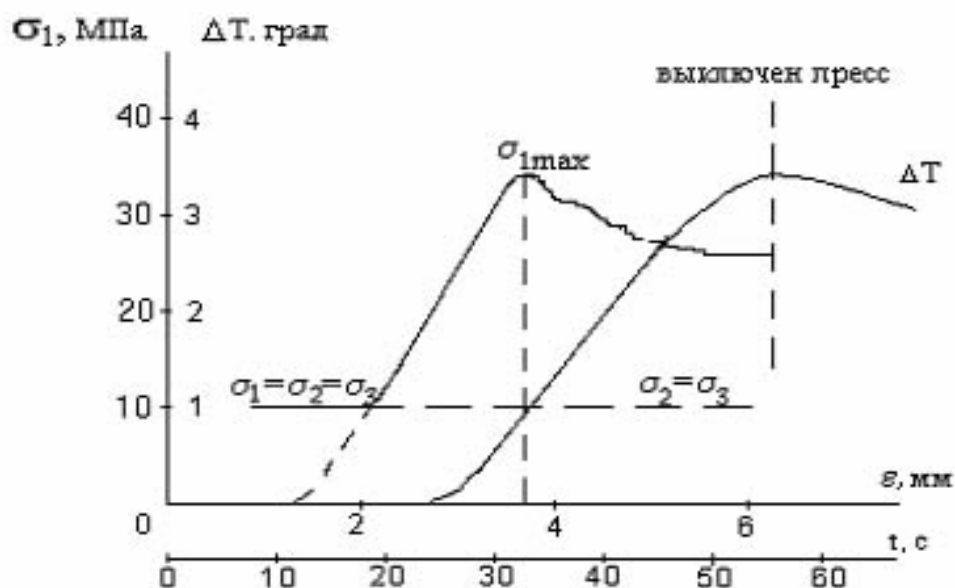


Рис. 2. Діаграма залежності «напруження – деформація – температура» в умовах об'ємного стиснення

Руйнування зразка проводилося при бічному навантаженні $\sigma_2 = \sigma_3 = 10$ МПа і тиску газу 3,2 МПа.

Температура угольного образца начинает заметно повышаться при достижении $\sigma_1 = 0,7-0,8$ предела прочности угля σ_{1max} в условиях объемного сжатия, что соответствует началу частичного трещинообразования (дилатансии). По диаграмме «напряжение-деформация» определялась энергия на стадиях упругого и упруго-пластического деформирования.

Эксперименты показали, что в разрушающемся образце может происходить «дополнительная» сорбция метана углем в результате механохимических процессов, сопровождающих разрушение угля. Когда максимальное напряжение сжатия изменялось в диапазоне от 30 до 60 МПа, температура угля возрастает на $2-5^\circ\text{C}$, что свидетельствует о протекании механохимических процессов в угле и образовании «дополнительного» метана, расчетное количество которого составляло в условиях лабораторного эксперимента до $2,5\text{ см}^3/\text{г}$.

2. Акустика призабойной части массива горных пород.
Влияние зоны ПГД на АЧХ виброакустических колебаний при техногенном воздействии на массив выражается в виде перераспределения колебательной энергии между отдельными составляющими спектра (рис. 3). АЧХ регистрируемых колебаний формируется исходным горно-геологическим строением угленосного массива и местоположением по отношению к горным работам зоны ПГД.

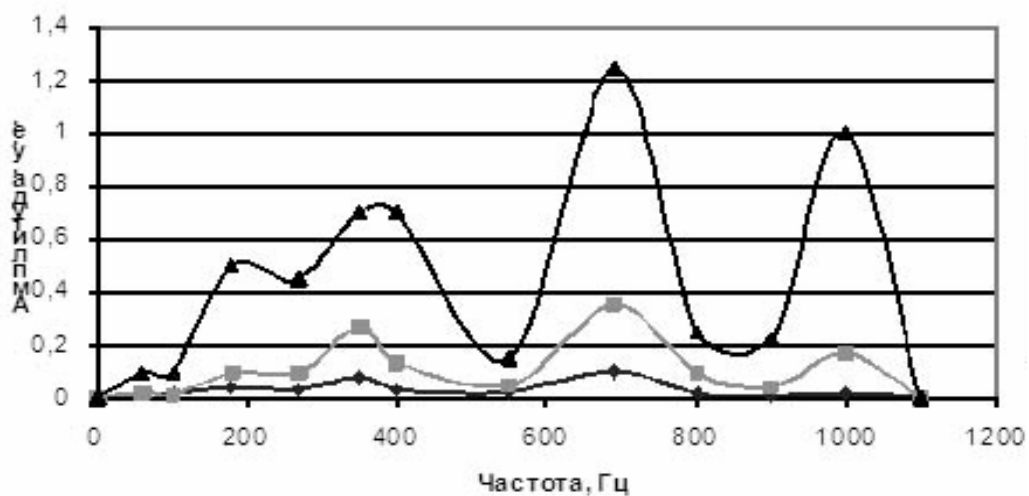


Рис. 3. АЧХ колебательного процесса при различном расположении зоны ПГД

По мере углубления горных работ в зону ПГД высокочастотная составляющая АЧХ закономерно растет значительно быстрее низкочастотной, в некоторый момент опережает ее и разделяется на две группы колебаний в диапазонах 550-850 Гц и 850-1100 Гц. Установленные закономерности предоставляют методическую возможность формирования аппарата информативных параметров и критериев прогнозирования выбросоопасности массива в режиме реального времени.

3. Оценка выбросоопасности массива. Соотношение между глубиной заходки при выемке и длиной зоны разгрузки впереди забоя, определяемое параметром l_0/l_k , влияет на устойчивость призабойной зоны пласта и играет решающую роль в формировании выбросоопасной ситуации. Размеры зоны разгрузки краевой части пласта l_k впереди движущегося забоя, необходимой для предотвращения ГДЯ, определяются по формуле:

$$l_k = (W_z + 0,33W_y)l_0/0,18. \quad (2)$$

Безопасная скорость забоя (глубина выемки) в зависимости от степени потенциальной выбросоопасности пласта определяется по графику рис. 4.

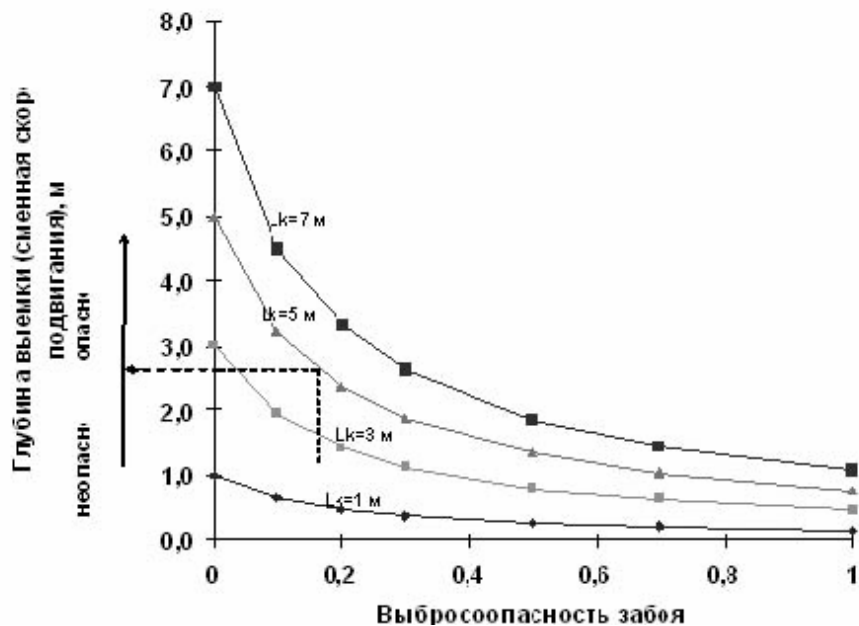


Рис. 4. График определения безопасной сменной скорости подвигания забоя (глубины выемки) в зависимости от степени потенциальной выбросоопасности пласта

4. Оценка потенциальной опасности по ГДЯ участков угольных пластов. Потенциальная (природная) опасность пласта по ГДЯ оценивается суммой энергии горного давления и эффективной энергии газа, содержащихся в угольном пласте и определяется критерием:

$$B_{\Pi} = (W_{\Gamma} + 0,33W_{\gamma}) - 0,18 \quad (3)$$

где: W_{Γ} - эффективная энергия газа, заключенная в угольном пласте, МДж/м³;

При $B_{\Pi} < 0$ угольный пласт является неопасным по ГДЯ, при $B_{\Pi} \geq 0$ опасным.

Для определения геомеханической энергии (W_{Γ} , W_{γ}) и природной опасности угольных пластов по ГДЯ в качестве исходных используются стандартные геологоразведочные данные: X - газоносность угольного пласта, м³/т; глубина пластопересечения H , м; данные кавернометрии в месте пересечения пласта скважиной, d_{max} , d_{min} , $d_{скв}$, мм; температура пласта, $t^{\circ}\text{C}$; данные технического анализа угля: выход летучих V^{daf} , зольность угля A и влажность W , %.

Для Кузбасса получена эмпирическая зависимость, которая позволяет производить расчет энергии газа W_{Γ} экспресс-методом по формуле

$$W_{\Gamma} = (9,3 \cdot X - 0,01) \cdot X \cdot b_{30} \cdot d \quad (4)$$

ГДЯ на шахтах возникают с глубины разработки, где суммарная геоэнергия пласта ($W_{\Gamma} + W_{\gamma}$) достигает уровня, превосходящего 0,4 МДж/м³ и обеспечивающего лавинное самоподдерживающееся разрушение.

5. Оценка выбросоопасности забоев очистных и подготовительных выработок с учетом скорости их подвигания. Выбросоопасность очистных и подготовительных забоев горных выработок определяется потенциальной (природной) выбросоопасностью разрабатываемого пласта $B_{\Pi} = f(W_{\Gamma}, W_{\gamma})$, а также глубиной выемки или сменным подвиганием забоя l_0 и величиной зоны разгрузки и дегазации в призабойной части пласта l_k . Для оценки влияния технологии на опасность возникновения газодинамических явлений в формулу $B_{\Pi} = (W_{\Gamma} + 0,33W_{\gamma}) - 0,18$ вводится безразмерный технологический параметр l_0/l_k , который характеризует устойчивость краевой части пласта в момент подвигания забоя.

Оценка опасности по ГДЯ забоев горных выработок с учетом параметров технологии выемки угольного пласта производится по критерию:

$$B = (W_r + 0,33W_y) \cdot l_0/l_k - 0,18 \quad (5)$$

где l_0 - сменная скорость подвигания забоя (м/смену) или глубина заходки (м);

l_k - величина зоны разгрузки и дегазации в призабойной части пласта (м).

При $B < 0$ забой горной выработки не опасен, при $B \geq 0$ забой выбросоопасен.

В соответствии с вышеизложенным, стратегия управления состоянием массива горных пород для предотвращения ГДЯ должна основываться на том, что их первопричина – геомеханические процессы, происходящие на макро- и мезоуровнях. Поэтому для предотвращения ГДЯ и интенсификации газоотдачи угольных пластов необходимы соответствующие технологии контроля и управления геомеханическими процессами.

6. Автоматизированная система комплексного геофизического и геомеханического мониторинга опасности газодинамических явлений в шахтах. Проблема прогноза и контроля ГДЯ в высокопроизводительных шахтах рассматривается как задача прогноза устойчивости природно-технической системы «массив горных пород – техногенное воздействие» и решается на основе комплексного подхода, объединяющего методы контроля и прогноза опасности динамических явлений с ГИС. Этот подход реализован в разработанной ИПКОН РАН автоматизированной системе прогнозирования опасности ведения горных работ по фактору риска ГДЯ и ГЯ. АС реализует методику комплексного контроля и прогноза в соответствии с выше изложенным, имеет блочно-модульный принцип построения и формируется из четырех основных подсистем (блоков): сейсмоакустический контроль напряженно-деформированного состояния и разрушения приконтурной части массива; сейсмический контроль напряженно-деформированного состояния выемочного участка и шахтного поля; контроль газодинамической активности приконтурной части массива; геомеханический прогноз, диагностика и оценка опасности ГДЯ.