УДК 622.411.332

А.Д.РУБАН, *д-р техн. наук, Ruban_ad@mail.ru*
УРАН ИПКОН РАН, Москва

A.D.RUBAN, *Dr. in eng. sc., Ruban_ad@mail.ru*
URAN IPKON RAS, Moscow

ИЗУЧЕНИЕ ГАЗО- И ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОГЕННО ИЗМЕНЯЕМОГО УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА

Интенсификация и концентрация горных работ значительно повышают риск геодинамических и газодинамических явлений в угольных шахтах. Представлены результаты аналитических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния массива горных пород при техногенном воздействии. Установлены критериальные условия возможности возникновения лавинного разрушения углепородного массива при указанных явлениях. Приведены критерии оценки опасности углепородного массива и забоев очистных и подготовительных выработок по газодинамическим явлениям. Сформирована структура автоматизированной системы мониторинга опасности газо- и геодинамических явлений в шахтах.

Ключевые слова: газо- и геодинамические явления, автоматизированная система мониторинга, опасное состояние массива.

STUDY OF GAS-AND GEODYNAMIC STATE OF TECHNOGENICALLY CHANGEABLE COAL ROCK MASS

Intensification and concentration of the mining works increases substantially the risk of geo- and gasdynamic effects arising within the coal mines. Herewith are presented the results of the analytic and experimental studies on stress-strain state of rock mass due to technogenic impact. Under such conditions a potential avalanche destruction of coal rock mass may occur. Some criteria for evaluation of gas-dynamic danger for rock mass, for active stopes and development faces are given. The computer-aided system for monitoring of hazard of gas- and geodynamic phenomena in mines is suggested.

Key words: gas- and geodynamic phenomena, automated monitoring system, hazardous state of rock mass.

Установлено, что основное условие формирования в массиве горных пород очагов, потенциально опасных по газо- и геодинамическим явлениям (ГЯ и ГДЯ), заключается в создании природно-техногенных условий для проявления в призабойной зоне массива эффекта накопления и быстрого сброса (высвобождения) критических значений геоэнергии. Реализация такого эффекта определяется возможностью развития ряда последовательных и взаимосвязанных механизмов изменения напряженно-деформированного состояния, физико-химических изменений и процессов разрушения горных пород.

Напряженно-деформированное и газодинамическое состояние приконтурной части угольного пласта. Характерной особенностью выбросоопасных и удароопасных участков угольных пластов является высокая изменчивость коэффициента концентрации напряжений и размеров области предельно-напряженного состояния в призабойной зоне массива по мере подвигания забоя горной выработки. Диапазоны изменения параметров напряженного состояния призабойной зоны угольных пластов в опасных (числитель) и неопасных (знаменатель) зонах по экспериментальным данным показаны ниже:

$K = \sigma_{max}/\sigma_0$	$l_к(m$ = 1-2 м)	gradσ
1,8-4,7	1-3	1,2-2,5
1,2-1,5	4-9	0,3-0,8

Здесь $l_к$, $K = \sigma_{max}/\sigma_0$, grad$\sigma = \sigma_{max}/\sigma_0 l_к$ – длина области спада напряжений, коэффициент напряжений и градиент концентрации напряжений в краевой части пластов, соответственно. Оценочные расчеты по формуле $W = \sigma_{ср}^2/2E$, где $\sigma_{ср}$ – средние напряжения в пласте; E – модуль упругости угля, показывают, что упругая энергия в опасных зонах соответственно возрастает в 3-10 раз. Это обстоятельство существенным образом влияет на возможность возникновения процесса лавинного самоподдерживающегося разрушения высвобождающейся геоэнергией.

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

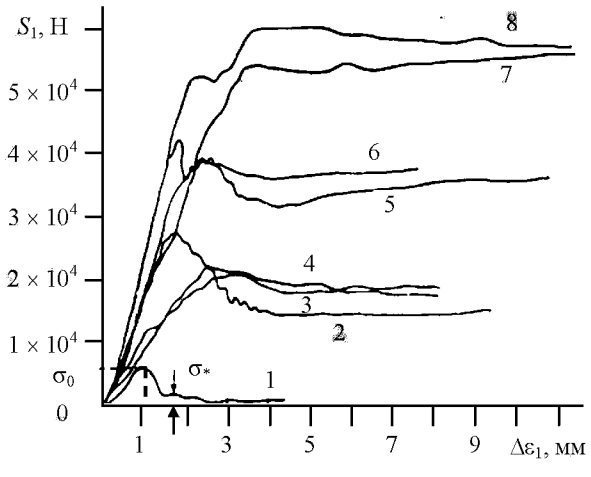


Рис.1. Полные диаграммы напряжения (осевая нагрузка) – деформация $\sigma_1(S) - \varepsilon$ при различном боковом сжатии (σ_3 = 0-15,0 МПа) и насыщении метаном при давлении P = 0-3 МПа для угля II-III степени тектонической нарушенности

1 – σ_3 = 0; P = 0; 2 – σ_3 = 5,0; P = 3,0; 3 – σ_3 = 4,0; P = 2,0; 4 – σ_3 = 4,0; P = 2,0; 5 – σ_3 = 9,0; P = 2,0; 6 – σ_3 = 7,0; P = 0; 7 – σ_3 = 13,0; P = 0; 8 – σ_3 = 15,0; P = 2

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 $\sigma_3 >$ 13-18 МПа (кривые 7-8 на рис.1) запредельные кривые деформирования становятся горизонтальными (модуль спада $\mu \approx 0$), а предел прочности σ_{1max} 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 $\sigma_3 <$ 5-7 МПа (кривые 2-6, рис.1) запредельные кривые имеют хорошо выраженную ветвь спада напряжений σ_1, предел прочности существенно превышает остаточную прочность, а разрушение носит хрупко-пластичный характер, преимущественно путем отрыва.

Таким образом, определено условие разрушения углей в объемном напряженном состоянии – $\sigma_3/\sigma_1 = C \le 0{,}35$. При $C > 0{,}35$ разрушение не происходит и возможен процесс роста концентрации напряжений. При насыщении угля метаном под давлением P = 1-3 МПа (кривые 2-5, 8 на рис.1) и сохранении давления газа в процессе эксперимента характер разрушения несколько изменяется, величина критерия снижается до $\sigma_3'/\sigma_1' = C' \le 0{,}30$, где σ_3 и σ_1 – так называемые «эффективные» напряжения, учитывающие трещинно-поровое давление газа.

Процесс снятия бокового сжатия массива σ_3 по оси, ориентированной в сторону забоя, должен сопровождаться перескоком с более высокого уровня прочности угля на более низкий в зависимости от величины снимаемого бокового напряжения. Этот момент является характерной точкой би-

фуркации, определяющей, по какому сценарию пойдет дальше развитие процесса разрушения – обычного трещинообразования и отжима или лавинного самоподдерживающегося разрушения, характерного для газо- и геодинамических явлений. Экспериментально установлено, что критериальными условиями, определяющими возможность возникновения лавинного разрушения являются следующие:

– запас реализуемой удельной потенциальной геоэнергии (упругой энергии сжатия угля при горных ударах и суммы упругой энергии сжатия и энергии выделяющегося газа при внезапных выбросах угля и газа) должен быть выше 2-3 МДж/м^3.

– характерная скорость сброса бокового напряжения не должна быть ниже 1-3 МПа/с.

При исследовании термодинамических условий разрушения газонасыщенного угля в призабойной зоне угольного пласта осевая нагрузка на образец σ_1 создавалась независимо от боковой нагрузки σ_3. Регистрировалась диаграмма осевая нагрузка – осевая деформация, а также боковое напряжение $\sigma_2 = \sigma_3$, давление газа P и изменение температуры образца (рис.2).

Разрушение образца проводилось при боковой нагрузке $\sigma_2 = \sigma_3 = 10$ МПа и давлении газа 3,2 МПа.

Температура угольного образца начинает заметно повышаться при достижении $\sigma_1 = 0{,}7\text{-}0{,}8$, предела прочности угля σ_{1max} в условиях объемного сжатия, что соответствует переходу от упругого деформирования к упругопластическому и началу частичного трещинообразования (дилатансии).

По диаграмме напряжение – деформация определялась энергия на стадиях упругого и упруго-пластического деформирования

$$W = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma_1 d\varepsilon . \qquad (1)$$

Расчеты показывают, что при высоких уровнях напряжений сжатия вся энергия, полученная образцом от пресса, меньше энергии, затраченной на нагревание образца. Объяснить аномальное нагревание угольного образца можно предположением, что в разрушающемся образце происходит «дополнительная» сорбция метана углем в результате механохимических процессов, сопровождающих разрушение угля. Процесс образования «дополнительного» метана начинается при переходе деформирования от упругого к упругопластическому, т.е. началу трещинообразования и усиливается в запредельной области деформирования.

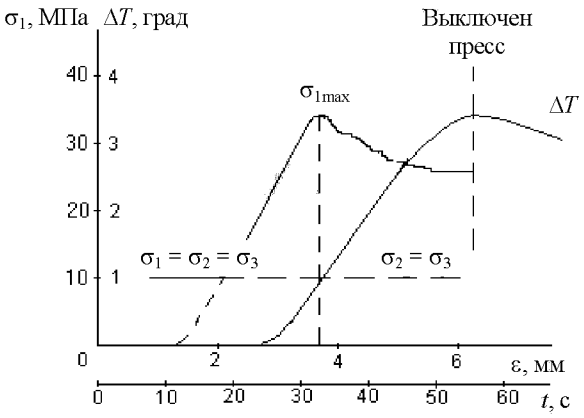


Рис.2. Диаграмма зависимости напряжение – деформация – температура в условиях объемного сжатия

Анализ зависимостей изменения температуры угля от величины напряжений сжатия показал, что при условно низких уровнях напряженности, когда максимальное сжатие меньше 30 МПа, возрастание температуры невелико – не превышает 1-2 °С, следовательно и метанообразование практически не происходит. Когда максимальное напряжение сжатия изменялось в диапазоне от 30 до 60 МПа, температура угля возрастает на 2-5 °С, что свидетельствует о протекании механохимических процессов в угле и образовании «дополнительного» метана, расчетное количество которого составляло в условиях лабораторного эксперимента до 2,5 см^3/г.

Акустика призабойной части массива горных пород. Влияние зоны ПГД на амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) виброакустических колебаний при техногенном воздействии на массив выражается в виде

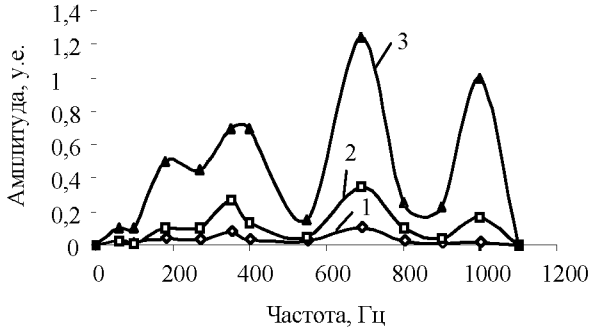


Рис.3. АЧХ колебательного процесса при различном расположении зоны ПГД

1 – 5 м до нарушения; 2 – 0 м до нарушения; 3 – 5 м в нарушении

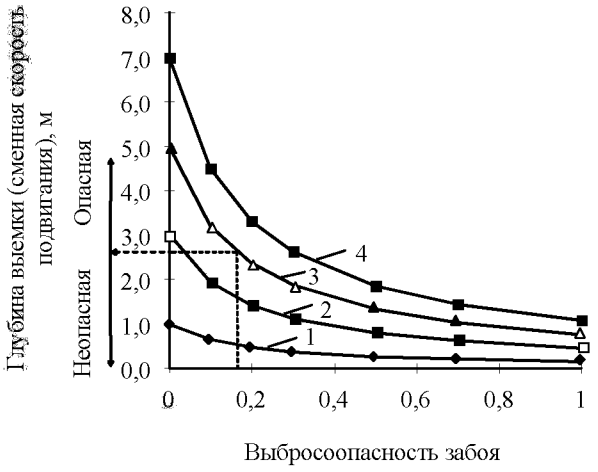


Рис.4. График определения безопасной сменной скорости подвигания забоя (глубины выемки) в зависимости от степени потенциальной выбросоопасности пласта

1 – $l_к$ = 1 м; 2 – 3 м; 3 – 5 м; 4 – 7 м

перераспределения колебательной энергии между отдельными составляющими спектра (рис.3). АЧХ регистрируемых колебаний формируется исходным горно-геологическим строением углепородного массива и местоположением по отношению к горным работам зоны ПГД.

Энергия колебательного процесса перераспределяется между отдельными областями спектра с определенной закономерностью при различном положении 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 и 850-1100 Гц.

Аналогичные данные получены экспериментально на ряде шахт – им.Скочинского, Первомайская и др. Установлены закономерности изменения спектральных и амплитудных характеристик акустических колебаний углепородного массива в зоне влияния комбинированной аномалии (зона ПГД и зона трещиноватости) и зоне ПГД. Данные закономерности предоставляют методическую возможность формирования аппарата информативных параметров и критериев прогнозирования выбросоопасности массива в режиме реального времени.

Оценка выбросоопасности массива. Соотношение между глубиной заходки при выемке и длиной зоны разгрузки впереди забоя, определяемое параметром $l_0/l_к$, существенно влияет на устойчивость призабойной зоны пласта и играет решающую роль в формировании выбросоопасной ситуации. Критерий оценки выбросоопасности B используется для определения неопасных в данных горно-геологических условиях скоростей подвигания подготовительных забоев, параметров технологии выемки угольных пластов и параметров управления состоянием массива для предотвращения ГДЯ. Размеры зоны разгрузки краевой части пласта впереди движущегося забоя, необходимой для предотвращения ГДЯ, определяются по формуле

$$l_к = \frac{(W_x + 0{,}33W_\sigma)l_0}{0{,}18}. \qquad (2)$$

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

$$B_{\text{п}} = (W_{\text{г}} + 0{,}33W_{\text{у}}) - 0{,}18, \qquad (3)$$

где $W_{\text{г}}$ – эффективная энергия газа, заключенная в угольном пласте, МДж/м^3.

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

Для определения геомеханической энергии ($W_{\text{г}}$, $W_{\text{у}}$) и природной опасности угольных пластов по ГДЯ в качестве исходных используются стандартные геолого-разведочные данные: X – газоносность угольного пласта, м^3/т; глубина пластопересечения H, м; данные кавернометрии в месте пересечения пласта скважиной $d_{\max}$, $d_{\min}$, $d_{\text{скв}}$, мм; температура пласта t, °С; 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 экспресс-методом по формуле

$$W_{\text{г}} = (9{,}3X - 0{,}01)Xb_{30}d. \qquad (4)$$

Оценка изменения энергии угольных пластов с ростом глубины залегания в условиях Кузнецкого бассейна показывает, что в зонах ПГД упругая энергия угля превосходит эффективную энергию газа в несколько раз. ГДЯ на шахтах возникают с глубины разработки, где суммарная геоэнергия пласта ($W_{\text{г}} + W_{\text{у}}$) достигает уровня, превосходящего 0,4 МДж/м^3 и обеспечивающего лавинное самоподдерживающееся разрушение.

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.

$B_{\text{п}} = f(W_{\text{г}}, W_{\text{у}})$ и такими технологическими показателями, как глубина выемки или сменное подвигание забоя l_0 и величина зоны разгрузки и дегазации в призабойной части пласта $l_{\text{к}}$. Для оценки влияния технологии на опасность возникновения газодинамических явлений в формулу $B_{\text{п}} = (W_{\text{г}} + 0{,}33W_{\text{у}}) - 0{,}18$ вводится безразмерный технологический параметр $l_0/l_{\text{к}}$, который характеризует устойчивость краевой части пласта в самый выбросоопасный момент – момент подвигания забоя.

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

$$B = (W_{\text{г}} + 0{,}33W_{\text{у}})l_0/l_{\text{к}} - 0{,}18. \qquad (5)$$

При $B < 0$ забой горной выработки не опасен, при $B \geq 0$ забой выбросоопасен. Оценки опасности по ГДЯ забоев горных выработок по критерию B уточняются в процессе ведения горных работ по данным текущего контроля выбросоопасности.

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. Физико-химические процессы на микроуровне являются следствием развития геомеханических процессов. Поэтому для предотвращения ГДЯ и интенсификации газоотдачи угольных пластов с целью повышения эффективности дегазации необходимы соответствующие технологии контроля и управления геомеханическими процессами.

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. Автоматизированная система осуществляет мониторинг опасности динамических явлений в подготовительных и очистных забоях горных выработок (те-

кущий и локальный прогноз) и контролирует изменение НДС и ГДС углеродного массива во времени и пространстве в пределах шахтного поля (региональный и территориальный прогноз).

Автоматизированная система реализует методику комплексного контроля и прогноза в соответствии с вышеизложенным, 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.