

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
УСТОЙЧИВОСТИ ВЫРАБОТОК ГЛУБОКИХ ШАХТ**

д.т.н. Касьян Н.Н. (ДонНТУ)

На базі виконаних аналітичних розрахунків прогнозу зони зруйнованих порід і встановленого характеру геомеханічних процесів усередині неї сформульовані геомеханічні основи забезпечення стійкості виробок глибоких шахт і запропоновані нові способи їх охорони.

**THE GEOMECHANICS BASIS OF PROVIDING OF STABILITY
OF MAKING OF DEEP MINES**

Kasyan N.N.

On the base of the executed analytical calculations of prognosis of area of the blasted breeds and set character of geomechanics processes into her geomechanics bases of providing of stability of making of deep mines are formulated and the new methods of their guard are offered.

Одной из важнейших задач горной геомеханики является обеспечение устойчивости выработок. В условиях глубоких шахт изменяется динамика и характер геомеханических процессов, происходящих в породном массиве, вмещающем выработку.

Анализ существующих представлений о механизме проявления горного давления в окрестности поддерживаемых выработок показал, что образование и развитие зоны разрушенных пород (ЗРП) во многом определяет их состояние. В то же время закономерности процессов, происходящих внутри ЗРП пока изучены недостаточно. А именно через эту зону осуществляется взаимодействие крепи выработок и движущегося фронта разрушения пород. Исследование этого механизма является научной основой разработки эффективных способов обеспечения устойчивости выработок.

Результаты известных аналитических расчетов имеют значительные расхождения с данными шахтных наблюдений. Величина ЗРП получается значительно меньших размеров, а смещения по периметру выработки носят равномерный характер, что не соответствует действительности. Причиной расхождений расчетных и фактических данных, характеризующих величину ЗРП, на наш взгляд, является несоответствие динамического характера решаемой задачи ее статической постановке. По мнению Г.Г. Литвинского, это несоответствие отражается в том, что задача по определению размера ЗРП, большинством исследователей решается при одноразовом «залповом» принятии граничных условий [1]. Такая постановка задачи не учитывает перераспределение напряжений, связанное с перемещением фронта разрушений в глубь массива. Учет этого обстоятельства возможен при пошаговом решении задачи, когда граничные условия для каждого по-

следующего шага принимаются с учетом изменений, связанных с реализацией предыдущего шага.

Смещения контура выработок является следствием сложных геомеханических процессов, происходящих в окружающем породном массиве. Поэтому попытки исследователей однозначно (функционально) установить зависимость между параметрами, характеризующими условия образования ЗРП во времени, поведение пород внутри разрушенной зоны и смещением контура выработок приводят к значительной идеализации механизма проявления горного давления, в котором не отражается физическая сущность геомеханических процессов.

Выход из этой ситуации, на наш взгляд, возможен при экспериментально-фенологическом подходе к решению задачи, в котором наряду с определенной идеализацией расчетной схемы максимально отражается физическая сущность происходящих процессов. При этом используются данные результатов лабораторных и шахтных исследований.

Разработанный аналитико-экспериментальный метод прогноза размеров ЗРП, основанный на использовании положений механики хрупкого разрушения и пошагового решения задачи с учетом изменения прочностных и реологических параметров породного массива, относительно их характеристик, полученных по результатам испытаний пород в образце, позволил получить зависимость относительного размера ЗРП от времени существования выработки [2].

$$(r_3/r_6)_t = (r_3/r_6)_{\max} - [(r_3/r_6)_{\max} - 1] e^{-K_n \alpha t}, \quad (1)$$

где $(r_3/r_6)_t$ – относительная величина ЗРП на момент времени t , $(r_3/r_6)_{\max}$ – максимальная относительная величина ЗРП на момент времени, равный продолжительности ее формирования T , α – коэффициент, характеризующий скорость роста ЗРП ($\alpha = (r_3/r_6)_{\max}/T$), 1/сут, K_n – коэффициент, учитываю-

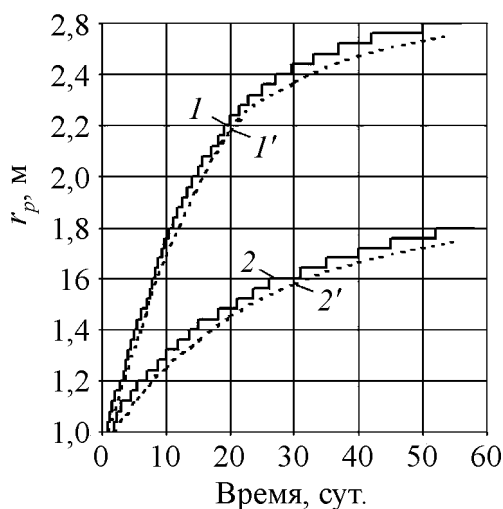


Рис. 1.

щий увеличение скорости роста ЗРП относительно ее средней величины.

На рис. 1 приведены графики зависимости величины ЗРП от времени. Кривые 1, 2 соответствуют расчетным данным, полученным при реализации программы «Зона». Кривые 1' и 2' построены с использованием зависимости (1). Анализ графиков показывает, что расхождения значений величины ЗРП, полученных в результате расчетов по программе «Зона» и по зависимости (1), не превышают 2–3%. Следовательно, зависимость (1) мож-

но использовать в инженерных расчетах для прогноза величины ЗРП во времени.

Для обоснования способов эффективного управления состоянием породного массива вокруг горных выработок необходимо установить степень влияния основных факторов (H, R, R_0, p, ρ) на величину ЗРП.

С этой целью были выполнены аналитические расчеты величины ЗРП, в которых изменялось значение одного из вышеуказанных параметров при фиксированных средних значениях остальных. Количественная оценка степени влияния каждого параметра производилась через показатель K_r , который определялся:

$$K_r = r_p^m / r_p, \quad (2)$$

где r_p^m, r_p – соответственно ЗРП, соответствующие текущему (изменяемому) и среднему значениям интересующего нас параметра, м.

На рис. 2 показаны графики зависимости показателя K_r от значений влияющих факторов. Анализ графиков показывает, что по степени влияния на величину ЗРП факторы располагаются в следующей последовательности: ρ, H, R, R_0, p .

При этом изменения на 1% значений перечисленных факторов вызывает изменение ЗРП, соответственно на 1,4–1,8; 0,76–0,81; 0,45–0,53; 0,26–0,58; 0,36–0,07%.

Анализ степени влияния различных факторов на величину ЗРП показывает, что эффективное воздействие на ее рост возможно только за счет изменения значений факторов, поддающихся управлению. По степени влияния на размеры ЗРП эти факторы располагаются в следующем порядке – ρ, R_0 и P .

Наибольшее влияние на величину формирующейся ЗРП оказывает угол внутреннего трения разрушенных пород (ρ). Так, увеличение ρ с 30° до 45° приводит к уменьшению ЗРП на 72%. Следует отметить, что параметр ρ не является постоянной характеристикой разрушенных пород, а есть показатель, характеризующий состояние разрушенного породного массива и зависящий от типа пород, размера и формы фрагментов ЗРП, вида и степени напряженного состояния разрушенного массива.

На сегодняшний день вопрос о зависимости угла внутреннего трения разрушенных пород от перечисленных факторов изучен не полностью.

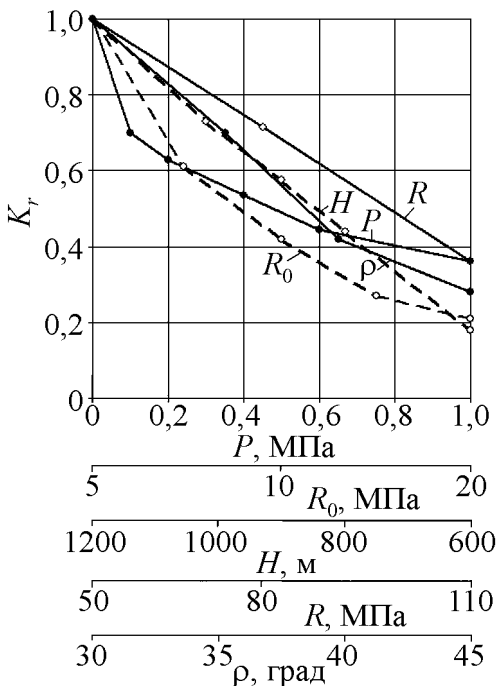


Рис. 2.

Остаточная прочность разрушенных пород R_0 характеризует их возможность сохранять грузонесущую способность в некотором объеме как конструкции. Исследованиями ИГТМ НАН Украины доказано, что изменением вида напряженного состояния разрушенных пород (от одноосного к плоскому и к объемному) можно существенно повысить их остаточную прочность [3].

Степень влияния несущей способности крепи p существенным образом зависит от величины отпора. Увеличение p до 0,1 МПа вызывает уменьшение ЗРП на 30%. Это обстоятельство говорит о том, что только за счет введения крепи в работу величина ЗРП уменьшается на 30%. Увеличение отпора крепи до 0,2 МПа приводит к уменьшению ЗРП еще на 7%. При отпоре крепи 0,6 МПа величина ЗРП уменьшается на 55%.

Практический и научный интерес представляет оценка эффективности увеличения отпора массиву на контуре выработок в зависимости от размера уже сформированной ЗРП. На рис. 3 приведены графики зависимости скорости роста ЗРП от величины отпора массиву на контуре выработки и относительного размера ЗРП. Их анализ показывает, что с увеличением ЗРП эффективность влияния отпора массиву существенно увеличивается. Так, если при относительном размере ЗРП, равном 1,25, увеличение отпора в 10 раз (с 0,1 до 1,0 МПа) приводит к уменьшению скорости роста ЗРП в 1,4 раза, то при величине ЗРП, равной 2, скорость роста зоны, в тех же условиях, уменьшается в 15 раз.

Для обоснования основных положений геомеханических основ обеспечения устойчивости выработок, наряду с прогнозом величины ЗРП, важнейшее значение имеет установление механизма взаимодействия движущегося фронта разрушения пород и крепи выработок. С использованием новой методики обработки и представления результатов натуральных наблюдений [4] были проанализированы данные шахтных наблюдений по 15-ти глубинным станциям. Это позволило проследить динамику деформирования пород внутри ЗРП в период ее формирования.

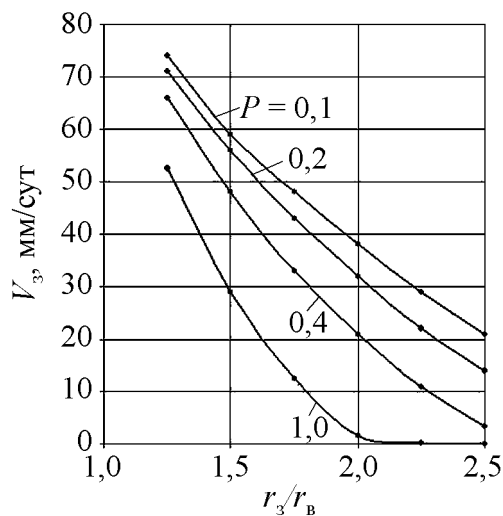


Рис. 3.

Для оценки характера деформационных процессов, происходящих в породном массиве, вмещающем выработку в зависимости от времени наблюдения (или в зависимости от расстояния до забоя выработки, лавы) и величины уже сформировавшейся ЗРП на определенный момент, определяемый очередным замером, используем круговую диаграмму. Такое представление позволяет дать анализ геомеханических процессов, происходящих в породном массиве вокруг выработки в качественном и количественном аспектах. При этом на мо-

мент замеров фиксируются четыре параметра: время существования выработки (или расстояние от наблюдательной станции до забоя выработки, лавы); размер сформировавшейся ЗРП; расстояние от контура выработки в глубь массива (по шагу установки глубинных реперов) и динамика изменения K_p .

Следует отметить, что с помощью диаграммы отражаются геомеханические процессы, происходящие в породном массиве только в направлении установки реперов глубинной станции. Однако, учитывая единую природу геомеханических процессов, результаты наблюдений по глубинной станции, состоящей из одной скважины, можно рассматривать в качестве информации, отражающей динамику деформационных процессов, происходящих в горном массиве вокруг выработки.

На рис. 4 показана динамика деформационных процессов внутри ЗРП при ее формировании в окрестности одиночной пластовой наклонной выработки по данным станции №14.

На расстоянии 15 м до забоя выработки величина ЗРП составляет 2 м. При этом породный массив между границей ЗРП и контуром выработки испытывает деформации растяжения.

При удалении забоя ходка на 25 м размер ЗРП увеличивается до 3 м. На этот момент породный массив на глубине 2 м от контура выработки сжимается, а на глубине 2–3 м испытывает деформации растяжения.

На расстоянии 50 м до забоя ЗРП увеличивается до 4 м. Деформации растяжения породного массива наблюдаются на глубине 0–2 и 3–4 м. Участок массива на глубине 2–3 м испытывает деформации сжатия. При дальнейшем увеличении расстояния до забоя ходка рост ЗРП не наблюдается. Однако деформационные процессы внутри нее продолжают.

На рис. 5 показана картина деформационных процессов внутри ЗРП при ее формировании вокруг выработки в зоне влияния лавы по данным натурных наблюдений по станции №1.



Рис. 4.

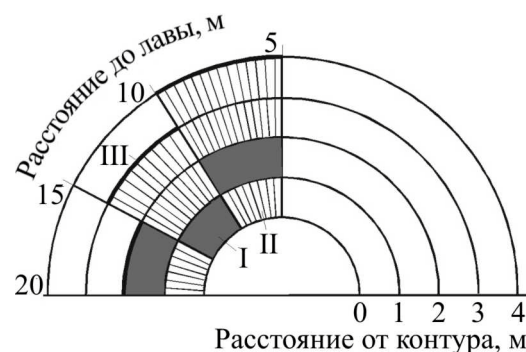


Рис. 5.

На момент подхода лавы на расстояние 15 м величина ЗРП составляла 2 м. При этом внутри нее наблюдается сжатие разрушенных пород на участке 1 м и расширение их на участке 1–2 м от контура выработки.

На расстоянии до лавы 10 м размер ЗРП составил 3 м. В толще пород шириной 2 м от границы ЗРП наблюдается сжатие пород. На участке шириной 1 м от контура выработки наблюдается расширение разрушенных пород.

При подходе лавы на расстояние 5 м отмечается рост ЗРП до 4 м, который сопровождается расширением разрушенного породного массива на участках 0–1 и 2–4 м. На участке 1–2 м наблюдается сжатие породного массива.

Таким образом, анализ динамики деформационных процессов по станции №1 показывает, что приближение лавы вызывает рост ЗРП, который сопровождается чередованием деформаций сжатия и растяжения уже разрушенного породного массива. Эта закономерность наблюдается как при уменьшении расстояния до лавы, так и при удалении от контура выработки (т.е. во времени и в пространстве).

Анализ результатов шахтных натуральных наблюдений по глубинным реперным станциям показал, что рост ЗРП вокруг выработок сопровождается образованием внутри нее и перемещением к контуру выработки в чередующемся порядке зон сжатия и растяжения. Установленная закономерность наблюдается как в одиночных выработках, так и в выработках, испытывающих влияние очистных работ.

Исследование силового взаимодействия фронта разрушения пород с крепью выработок производилось на структурных моделях. В процессе отработки моделей изменялся радиус ЗРП, размер и структура ее фрагментов, величина нагрузки, прикладываемая к ее внешней границе.

Анализ результатов испытаний структурных моделей показывает, что на количественные параметры взаимодействия между фронтом разрушения и крепью выработки кроме размеров ЗРП и величины прикладываемой нагрузки к ее внешней границе оказывает влияние размер фрагментов разрушенной зоны. На рис. 6 приведены графики изменения K_n при соотношении r_3/r_b , равном 2, в зависимости от размера фрагментов ЗРП (d_f/r_b) и величины внешней нагрузки (P), прикладываемой к внешней границе моделируемой

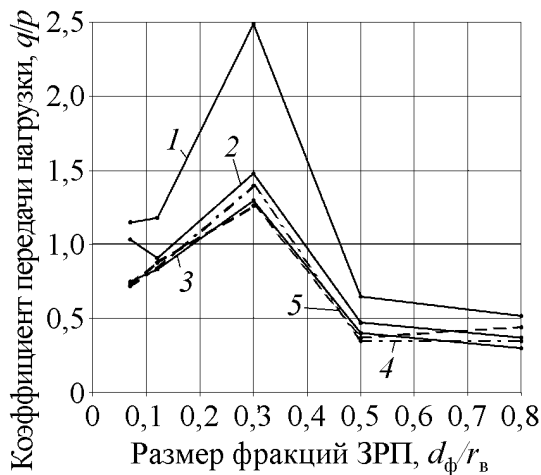


Рис. 6.

разрушенной зоны пород. Цифры 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют величине нагрузки, равной 10; 20; 40; 60; 80 кПа. Для условий, когда разрушенные породы представлены материалом с мелкой фракцией ($d_f/r_b = 0,07; 0,12$), коэффициент передачи нагрузки приближается к единице (0,75–1,15), что соответствует распределению давлений в жидкости. Увеличение размера фракций материала модели ($d_f/r_b = 0,5; 0,8$) приводит к уменьшению коэффициента передачи нагрузки до 0,65–0,3,

что больше соответствует процессу передачи нагрузки в сплошной среде, для которой его значение стремится к 0. В диапазоне размера фракций материала ЗРП $d_{\phi}/r_{в} = 0,2-0,4$ наблюдается резкое увеличение коэффициента передачи нагрузки до 1,8–2,5, что, на наш взгляд, объясняется специфической особенностью поведения сыпучего материала под нагрузкой, которая до настоящего времени не является полностью изученной.

Результаты лабораторных исследований подтверждают данные натуральных наблюдений о том, что ЗРП способна передавать нагрузку от внешней ее границы (фронт разрушения пород) к контуру выработки. При определенных соотношениях параметров ЗРП и степени ее внешнего нагружения в процессе передачи нагрузки происходит ее значительное увеличение на контуре выработки. С увеличением степени сжатия разрушенных пород происходит уменьшение коэффициента передачи нагрузки в 1,6–2 раза. Последнее обстоятельство применительно к режиму работы крепи трактуется так, что слишком податливая крепь, уходя от нагрузки, провоцирует эффект фокусирования давлений на нее за счет разуплотнения разрушенного массива и изменения характера взаимодействия между породными фрагментами – от контакта по поверхностям к точечному. Увеличение размеров породных фрагментов ЗРП приводит к значительному уменьшению коэффициента передачи нагрузки. Поэтому для повышения устойчивости выработок необходимо создавать условия для формирования крупноблочной структуры ЗРП либо искусственно, с помощью скрепляющих составов или анкерной крепи связывать породные фракции в более крупные фрагменты.

Анализ результатов шахтных и лабораторных исследований показал, что рост ЗРП вокруг выработок сопровождается образованием внутри нее и перемещением к контуру выработки в чередующемся порядке зон сжатия и растяжения. При этом в процессе силового взаимодействия фронта разрушения с крепью выработок в определенных условиях коэффициент передачи нагрузки больше единицы.

Результаты проведенных исследований позволяют сформулировать геомеханические основы обеспечения устойчивости выработок за счет повышения несущей способности разрушенных пород.

С учетом установленных особенностей и закономерностей деформационных процессов в ЗРП основные ее положения сводятся к следующему:

1. Необходимо техническими и технологическими средствами обеспечить включение в работу породного массива с момента его обнажения.

2. В условиях образования ЗРП эффективное повышение устойчивости выработок может быть обеспечено за счет создания грузонесущей оболочки из разрушенных пород и армирующих элементов. В разрезе установленной динамики деформационных процессов в ЗРП следует отметить, что установка армирующих элементов в радиальном направлении является мало эффективной. Армирующие элементы необходимо устанавливать в таком направлении, которое, с одной стороны, обеспечивало бы повышение сцепления

фрагментов разрушенного массива, а с другой – создавало бы максимальные препятствия смещению разрушенных пород в полость выработки.

3. Существенное повышение грузонесущей способности разрушенных пород в окрестности выработок может быть обеспечено за счет создания с помощью технических средств (анкерная крепь и упрочняющие составы) дополнительного бокового отпора в разрушенных породах, который обеспечивает их самозаклинивание при смещении в полость выработки.

Это позволило разработать ряд новых способов обеспечения устойчивости выработок с максимальным использованием естественной прочности пород [5]. Направление дальнейших исследований связано с обоснованием параметров и установлении области применения данных способов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвинский Г.Г., Бабиюк Г.В., Курман С.А. Моделирование на ЭВМ механизма разрушения пород вокруг выработки // Строительство шахт, механика и разрушение горных пород. / Сб. научн. трудов. – Алчевск: ДГМИ, 1996. – С. 87–94.
2. Поддержание и проветривание выработок глубоких шахт Донбасса // С.С. Гребенкин, Ю.Ф. Булгаков, Н.Н. Касьян и др. – Донецк: "Каштан", 2005. – 256 с.
3. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
4. Касьян Н.Н. Метод оценки характера деформационных процессов в массиве пород вокруг выработки // Изв. Донецкого горного института. – 1997.– №1(5). – С. 93–96.
5. Патент Украины 38093А Е21Д13/02. Способ охраны выработки / М.П. Зборщик, А.П. Клюев, Н.Н. Касьян, И.А. Скидан. – Оpub. 15.05.2001. Бюл. №4.
6. Авторское свидетельство 1481419 СССР, МКИ⁵ Е21Д13/02. Способ охраны выработок / Н.Н. Касьян, А.Ф. Морозов, О.Ю. Кузьмич, Е.И. Кольчик. – №4074526/23–03; Заявлено 04.06.86; Опубликовано 23.05.89. Бюл. №19.
7. Патент Украины 38094А Е21Д13/02. Способ повышения устойчивости горных выработок / Н.Н. Касьян, А.П. Клюев, Р.И. Азаматов. – Оpub. 15.05.2001. Бюл. №4.