

УДК 622.831.5

д.т.н., проф. Литвинский Г. Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, ligag@ya.ru)

ПАСПОРТ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ: СТАТИКА И КИНЕТИКА

Рассмотрена эволюция системы знаний в горной геомеханике от ползучего эмпиризма до современных математических моделей. Предложена последовательность решения геомеханических задач по прогнозу и обеспечению устойчивости горной выработки (ГВ). С общих позиций теории упругости изучена задача статика о напряжённо-деформированном состоянии (НДС) вокруг ГВ. Введён интегральный безразмерный параметр — локальный нормированный критерий разрушения (ЛНКР) ω^* . Впервые установлено несколько принципиально различных механизмов разрушения в зависимости от ЛНКР. Дан алгоритм построения паспорта устойчивости ГВ. Впервые поставлена и сформулирована задача кинетики изменения устойчивости пород и параметров движения фронта хрупкого разрушения, что позволяет перейти к решению нового класса задач горной геомеханики.

Ключевые слова: горная выработка, устойчивость, горное давление, методы прогноза, напряжённо-деформированное состояние, критерий разрушения, механизмы разрушения, паспорт устойчивости, статика и кинетика разрушения.

1 Введение

Большие объёмы проведения подземных горных выработок (ГВ) вызваны необходимостью ускоренного освоения подземного пространства и добычи минеральных ресурсов во всё более сложных горно-геологических условиях. Крепление и поддержание ГВ превратилось в сложную научно-прикладную проблему [1–6 и др.].

Устойчивость породного контура ГВ зависит от многих факторов, главнейшими из которых являются физико-механические свойства и напряжённо-деформированное состояние (НДС) горных пород, в совокупности формирующие процессы проявлений горного давления (ПГД). В результате ПГД подземные ГВ могут интенсивно деформироваться и разрушаться (рис. 1).

Как правило, в рамках изучения ПГД горная геомеханика последовательно решает две основные задачи:

1) изучение закономерностей ПГД и прогнозирование устойчивости подземных ГВ;

2) разработка способов и средств управления ПГД с целью повышения устойчивости и обеспечения эксплуатационного состояния ГВ.



Рисунок 1 Пучение почвы в штреках шахты «Павлоградская» (1978 г.)

Способы прогнозирования ПГД прошли длительный и сложный путь развития от примитивных расчётов на основе использования методов сопротивления материалов [1–3 и др.] до современных подходов на базе методов механики сплошных сред (теорий упругости, пластичности и ползучести). В последнее время широко используются пакеты прикладных программ с применением сложных алгоритмов в виде разнообразных численных методов моделирования на ЭВМ [4–6 и др.].

Тем не менее, несмотря на несомненные теоретические и экспериментальные успе-

хи, достигнутые в горной геомеханике, многие аспекты изучения сложных процессов ПГД вокруг ГВ остаются недостаточно исследованными. Это подтверждается наличием многочисленных трактовок и подходов при прогнозировании деформаций и разрушения окружающих пород. В противоречии с таким разнообразием методик и расчётов вне поля зрения исследователей остаётся факт многообразия форм ПГД, т. к. почти повсеместно прослеживается тенденция использования для описания всех видов ПГД лишь одного из возможных механизмов развития механических процессов при игнорировании остальных.

На самом деле в зависимости от горно-геологических условий вокруг выработок может быть несколько возможных вариантов проявлений деформирования и разрушения пород. Формы ПГД существенно, вплоть до противоположных закономерностей, варьируются в зависимости от сочетания напряжений и деформаций растяжения и сжатия на разных участках выработки. На это впервые было указано в работах [7, 8 и др.], в частности в новой классификации ПГД, где в основу положены условия исходного НДС горного массива на условно «малых» и «больших» глубинах разработки.

Поэтому столь ненадёжны существующие методы расчёта ПГД, а в нормативных документах по прогнозу ПГД и выбору параметров крепи преобладают эмпирические рекомендации. Накопленный производственный опыт ремонтов и переукреплений подземных ГВ только подтверждает недостаточную достоверность существующих представлений о ПГД и свидетельствует о сохраняющейся актуальности разработок этой проблемы.

Целью исследования является разработка и обоснование паспорта устойчивости ГВ, позволяющего систематизированно, с единых методических позиций оценить возможность разрушения пород контура ГВ и предсказать степень её устойчивости.

Идея работы состоит в использовании для построения паспорта устойчивости ГВ

интегрального безразмерного параметра — локального нормированного критерия разрушения — как основы для прогноза ПГД.

Объектом исследования являются напряжённо-деформированное состояние (НДС) и прочность пород в каждой характерной точке породного контура ГВ, а **предметом** — условия разрушения или сохранения устойчивости окружающих выработку пород.

Для этого следует рассмотреть такие **задачи исследования**:

- 1) дать краткий анализ существующих методов прогноза устойчивости ГВ;
- 2) оценить концентрацию напряжений на породном контуре ГВ в заданном поле исходных напряжений массива горных пород;
- 3) обосновать базовый параметр потери устойчивости ГВ в виде локального нормированного критерия разрушения (ЛНКР);
- 4) предложить идею и разработать методику построения паспорта устойчивости ГВ для определения устойчивых, предельных и разрушенных участков породного контура.

2 Методы прогноза устойчивости ГВ

Существующие методы прогноза ПГД сводятся к расчёту смещений породного контура ГВ и рекомендаций по выбору требуемых геомеханических параметров крепи (податливости, несущей способности, жёсткости и др.) для обеспечения его устойчивости. Однако достоверность такого прогноза невысока, поскольку коэффициент вариации расчётных показателей колеблется в пределах 30...50 % и более, чего явно недостаточно для практических целей.

Хотя этому можно посвятить отдельное исследование, кратко перечислим основные источники и причины такого низкого уровня достоверности методов прогноза ПГД:

– недостаточный существующий теоретический уровень знаний и изученности закономерностей ПГД, что проявляется, например, в стремлении охватить всё многообразие форм ПГД в одной расчётной модели, что невозможно;

– используемые расчётные модели и методы прогноза неизбежно содержат не вполне оправданные исходные гипотезы, идеализации и упрощения расчётных схем (такие как однородность, изотропность, осесимметричность, сплошность, стационарность и пр.), что приводит к значительным и неконтролируемым ошибкам прогноза;

– сами по себе исходные для расчётных схем прогноза данные, которые необходимо использовать, часто определяются весьма неточно, а их надёжность невозможно проследить и проконтролировать (НДС породного массива, локальные неоднородности геологического строения в виде пликативных и дизъюнктивных дислокаций, масштабный эффект, анизотропия физико-механических свойств трещиноватых и слоистых горных пород и др.).

Поэтому аналитические исследования, направленные на теоретическое прогнозирование ПГД, в настоящее время оказываются почти неприменимы и, как правило, они либо слишком схематичны, либо фрагментарно отражают лишь некоторые особенности ПГД.

Основную роль при прогнозе ПГД до сих пор играют эмпирические и аналоговые подходы, которые опираются главным образом на экспериментальные данные об особенностях ПГД в конкретных горно-геологических условиях данного горного предприятия или региона.

Однако эмпирические методы прогноза ПГД, несмотря на присущую им несколько большую надёжность благодаря привязке к условиям, где выполнялись экспериментальные замеры, обладают существенными недостатками:

– сами по себе экспериментальные данные во многом привязаны к конкретным горно-геологическим условиям: даже незначительное отклонение от них создаёт риск получения искажённых или даже неверных оценок, что может быть причиной серьёзных просчётов и аварий;

– концептуально ошибки заложены в сущности эмпирических методов: даже при

удовлетворительном решении первой задачи горной геомеханики (получении прогноза ПГД) остаются весьма сложными обоснование геомеханических параметров и оценка эффективности новых способов и средств предотвращения негативных последствий ПГД и целесообразности их применения. А это делает недостижимым решение второй задачи геомеханики — разработку способов предотвращения ПГД.

Именно таким сочетанием возможностей и недостатков теоретического и эмпирического методов при изучении ПГД и был обусловлен переход к их симбиозу — аналитико-экспериментальному методу исследований, который в настоящее время стал доминировать в горной геомеханике. При этом стала явно прослеживаться тенденция постепенного и неуклонного замещения в нём эмпирической компоненты всё большей долей теоретической составляющей. В свою очередь, развитие теоретических исследований вызывает всё новые требования к эксперименту и увеличивает число необходимых эмпирических данных и показателей о свойствах и состоянии массива горных пород. В этом и проявляется диалектическое противопоставление и единство этих подходов.

Можно утверждать, что решение геомеханических задач по прогнозу и обеспечению устойчивости ГВ следует выполнять в такой последовательности:

1) определить физико-механические свойства и начальное напряжённо-деформированное состояние (НДС) массива горных пород;

2) оценить концентрацию напряжений вокруг ГВ в заданном поле исходных напряжений;

3) рассчитать и построить паспорт прочности породного контура ГВ, т. е. найти участки контура выработки с устойчивыми, предельным и неустойчивым (за пределом прочности) состоянием;

4) дать прогноз последовательности и интенсивности деформирования и разрушения пород вокруг выработки;

5) разработать геомеханические и технологические параметры способов и средств обеспечения эксплуатационного состояния подземных выработок.

Первые два этапа в основном зависят от экспериментально-изыскательских работ по определению исходных данных и требуются для прогноза ПГД и ведения проектных работ. А третий этап решения задачи во многом зависит от принятых критериев разрушения горных пород, т. е. от выбранной концепции прочности.

Ранее описание прочности сводилось к использованию коэффициента крепости f_{II} профессора М. М. Протодяконова, и если ныне общепринятым критерием разрушения пород служит теория прочности Кулона — Мора, то ей на смену приходит аналитическая теория прочности [9].

При этом исходные данные о физико-механических свойствах горных пород, которые берут проектировщики из данных геологических изысканий, явно недостаточны для оценки устойчивости ГВ. Они исчерпываются в основном только прочностью на сжатие и растяжение перпендикулярно слоистости. На самом деле даже в образце, без учёта масштабного эффекта, прочность и деформируемость породы могут варьироваться, в зависимости от направления нагружения относительно слоистости, в разы. Следовательно, уже на этом предварительном этапе проектирования ГВ допускаются неприемлемые, а часто просто неверные исходные данные, что во многом обесценивает эффективность проектных работ. Поэтому без получения достоверных и представительных данных о свойствах ГП и исходном напряжённом состоянии породного массива прогноз ПГД невозможен.

3 Напряжённое состояние пород вокруг горной выработки

На втором этапе прогноза устойчивости ГВ следует оценить напряжённое состояние массива горных пород. Это, в свою очередь, требует знания исходного напря-

жённо-деформированного состояния нетронутого (до ведения горных работ) массива пород. Исходя из достигнутого уровня знаний о напряжениях в массиве, расчётную схему можно обобщённо представить, как показано на рисунке 2.

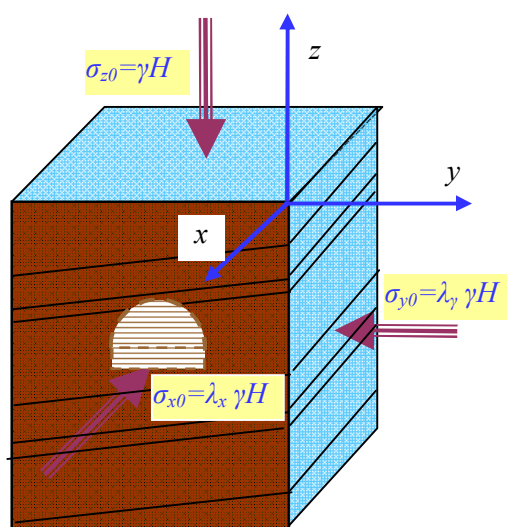


Рисунок 2 Обобщённая расчётная схема напряжённого состояния массива пород

В достаточно общем случае нетронутый массив горных пород находится в исходном поле напряжений, тензор которого $\|\sigma_0\|$ в координатах (x, y, z) равен

$$\|\sigma_0\| = \begin{vmatrix} \sigma_{x0} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y0} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{z0} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где $\sigma_{x0}, \sigma_{y0}, \sigma_{z0}$ — компоненты исходного поля напряжений горного массива, Па.

Обычно горизонтальные напряжения σ_{x0}, σ_{y0} выражают через коэффициенты бокового распора λ_x, λ_y и вертикальную компоненту тензора σ_{z0} в виде

$$\|\sigma_0\| = \begin{vmatrix} \sigma_{x0} = \lambda_x \sigma_{z0} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y0} = \lambda_y \sigma_{z0} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{z0} \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где σ_{z0} — вертикальная компонента тензора напряжений (по оси z), Па;

λ_x, λ_y — коэффициенты бокового распора соответственно по осям (x, y) , в общем случае $\lambda_x \neq \lambda_y$.

В случае если начальное напряжённое состояние однородного массива горных пород создано силами гравитационного и тектонического происхождения, эти коэффициенты удобно представлять в виде суммы гравитационной (G) и тектонической (T) составляющих тензора $\|\sigma_0\|$ из (2):

$$\lambda_x = \lambda_{xG} + \lambda_{xT}; \quad \lambda_y = \lambda_{yG} + \lambda_{yT}. \quad (3)$$

В горно-геологических условиях старых орогенических систем (типа Донбасса), как правило, вертикальная компонента формируется силами гравитации, поэтому её часто принимают равной

$$\sigma_{z0} = \gamma H, \quad (4)$$

где γ — средний объёмный вес пород, Н/м³;

H — проектная глубина, м.

Кроме того, если тектонические напряжения невелики (Донбасс), то ими можно пренебречь, т. е. $\lambda_{xT} \approx \lambda_{yT} \approx 0$. Поэтому тензор напряжений $\|\sigma_0\|$ принимает более простой вид:

$$\|\sigma_0\| = \begin{vmatrix} \lambda_{xG}\gamma H & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{yG}\gamma H & 0 \\ 0 & 0 & \gamma H \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Для однородного упругого изотропного массива горных пород при их горизонтальном залегании коэффициенты бокового распора можно получить из обобщённого закона Гука для упругого тела:

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{vmatrix} = \frac{1}{E} \begin{vmatrix} \sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z) \\ \sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x) \\ \sigma_z - \nu(\sigma_y + \sigma_x) \end{vmatrix}, \quad (6)$$

где E — продольный модуль упругости (модуль Юнга) пород на контуре ГВ, Па;

ν — коэффициент Пуассона пород.

Для нетронутого горного массива в силу симметричности и изотропности выполняются в любой его точке следующие условия для тензора деформаций:

$$\|\varepsilon\| = \begin{vmatrix} \varepsilon_x = 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y = 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \neq 0 \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Из (6) и (7) следует:

$$\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = \lambda \gamma H; \quad \lambda = \frac{\nu}{1-\nu}, \quad (8)$$

где λ — коэффициент бокового распора массива горных пород.

В результате длительных процессов релаксации, происходящих в массиве за время его существования, коэффициент λ постепенно стремится к своему асимптотическому пределу, равному 1. Поэтому коэффициент бокового распора для Донбасса колеблется в диапазоне 0,5...0,8 и весьма редко опускается до своего самого нижнего предела (8).

Перейдём к рассмотрению напряжённого состояния пород вокруг горной выработки и оценке устойчивости её породного контура. Вокруг выработки после её сооружения образуются сложные поля упругих напряжений и деформаций (рис. 3).

В окружающем породном массиве возникают, как видно из рисунка 3, области растягивающих и сжимающих напряжений с максимальной их концентрацией на контуре. Расшифровка таких полей напряжений представляет собой довольно непростую задачу. К тому же при этом надо учесть изменчивость этих полей при возникновении даже начальных признаков трещинообразования и разрушения. С целью упрощения задачи целесообразно оценку устойчивости ГВ начинать с рассмотрения напряжений на породном контуре ГВ, где концентрация напряжений максимальна и откуда начинается его разрушение.

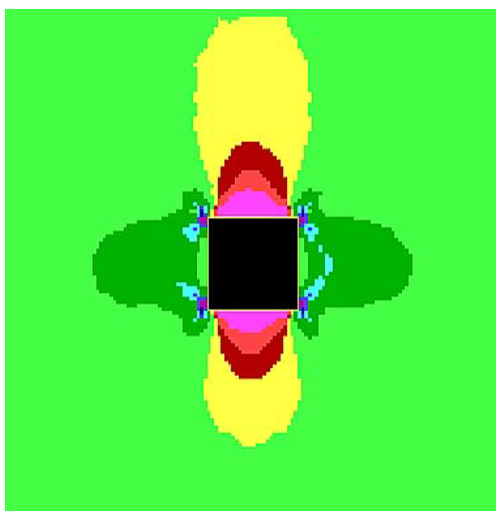


Рисунок 3 Поле напряжений вокруг квадратной ГВ при вертикальном сжатии массива

Выразим общие соотношения для определения деформаций с учётом плоского деформированного состояния породного контура ГВ. Воспользуемся граничными условиями на контуре ГВ, приняв во внимание, что при плоском деформированном состоянии тензор деформаций $\|\varepsilon\|$ в дополнительном поле напряжений с использованием осей n, t, x на контуре ГВ согласно рисунку 4 будет иметь вид

$$\|\varepsilon\| = \begin{vmatrix} \varepsilon_n \neq 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_t \neq 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_x = 0 \end{vmatrix}, \quad (9)$$

где $\varepsilon_n, \varepsilon_t, \varepsilon_x$ — компоненты тензора деформаций $\|\varepsilon\|$ на главных площадках в осях n, t, x породного контура выработки, когда ось x направлена вдоль оси ГВ (рис. 4).

Нормальное к контуру ГВ напряжение равно нулю $\sigma_n = 0$ по определению, если пренебречь отпором крепи ввиду его пренебрежимо малого значения по сравнению с упругими напряжениями. Напряжение σ_x , направленное вдоль оси выработки, можно найти, воспользовавшись обобщённым законом Гука в координатах n, t, x :

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_t \\ \varepsilon_x \end{vmatrix} = \frac{1}{E} \begin{vmatrix} \sigma_n - \nu(\sigma_t + \sigma_x) \\ \sigma_t - \nu(\sigma_x + \sigma_n) \\ \sigma_x - \nu(\sigma_n + \sigma_t) \end{vmatrix}, \quad (10)$$

где $\sigma_n, \sigma_t, \sigma_x$ — соответственно нормальное, окружное (тангенциальное) и продольное напряжения на породном контуре.

Из условия плоского деформированного состояния пород вдоль оси ГВ (9), т. е. равенства нулю деформаций $\varepsilon_x = 0$, можно найти из (10) значение напряжений вдоль оси ГВ с учётом $\sigma_n = 0$:

$$\sigma_x = \nu(\sigma_n + \sigma_t) + \sigma_{x0} = \nu\sigma_t + \sigma_{x0}, \quad (11)$$

где σ_{x0} — направленная согласно (1) вдоль оси ГВ компонента исходного поля $\|\sigma_0\|$ напряжений массива горных пород.

При этом в (11) учтена осевая компонента σ_{x0} исходного поля напряжений, полученная из условия равенства нулю деформаций $\varepsilon_x = 0$, что даёт $\sigma_z = \nu \cdot \sigma_t$. Отсюда получаем тензор напряжений на контуре ГВ в координатах n, t, x (рис. 4):

$$\|\sigma\| = \begin{vmatrix} \sigma_n = 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_t \neq 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_x = \nu \cdot \sigma_t + \sigma_{x0} \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Следовательно, чтобы получить всю информацию о напряженном состоянии контура, необходимо определить лишь одно тангенциальное (окружное) напряжение σ_t на контуре ГВ.

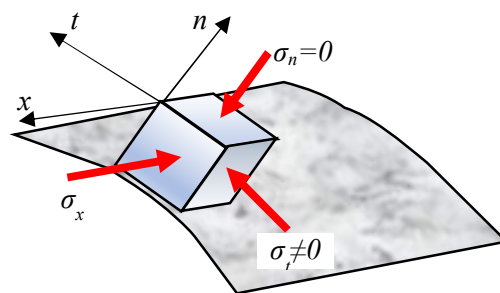


Рисунок 4 Главные напряжения в произвольной точке контура ГВ

4 Локальный нормированный критерий разрушения (ЛНКР)

О возможности разрушения можно судить, сопоставляя действующие на контуре напряжения (12) с соответствующей прочностью в каждой точке контура ГВ. Для построения эпюры прочности на контуре ГВ необходимо знать только показатели пределов прочности на одноосные растяжение $[\sigma_p]$ и сжатие $[\sigma_c]$ для пород, выходящих на контур ГВ. Удобно наглядно представить сравнение прочности и напряжений в виде наложения соответствующих эпюр прочности $[\sigma_s]$ и тангенциальных напряжений σ_t на контуре горной выработки. В качестве примера на рисунке 5 показаны построенные на породном контуре эпюры прочности (1) породы на одноосные растяжение $[\sigma_p]$ и сжатие $[\sigma_c]$, наложенные на эпюру тангенциальных напряжений σ_t (2).

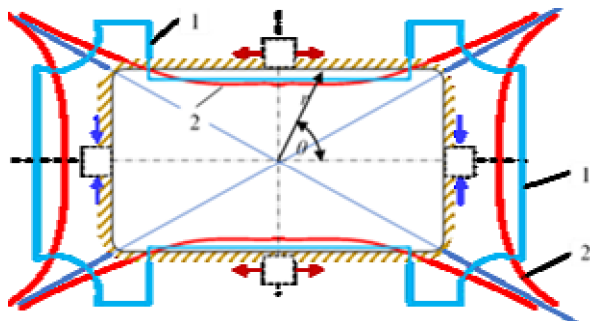


Рисунок 5 Эпюры прочности (1) и напряжений (2) на контуре прямоугольной ГВ

На первый взгляд, построенные эпюры представляют собой запутанное переплетение линий, из которых, по сути, необходимо определить, будет ли возникать разрушение на контуре, каков его тип, т. е. где и какие образуются трещины и как они будут распространяться вглубь массива пород.

Для адекватного описания разрушения пород вокруг выработки нами [5] предложен удобный безразмерный параметр — ло-

кальный нормированный критерий разрушения (ЛНКР) ω^* в виде соотношения

$$\omega^* = \frac{f(\sigma_{ij})}{\phi(\sigma_{ij}; s_{ij})}, \quad (13)$$

где $f(\sigma_{ij})$ — функция действующего тензора напряжений σ_{ij} в данной точке массива, Па;

$\phi(\sigma_{ij}; s_{ij})$ — функция, которая зависит от тензора действующих напряжений σ_{ij} и параметров прочности s_{ij} породы в данной точке. В частности, для аналитической теории прочности [9] необходимо знать три параметра прочности: когезию отрыва σ_0 , когезию сдвига τ_0 и коэффициент хрупкости α .

Для породного контура критерий ЛНКР (13) существенно упрощается и принимает вид

$$\omega^* = \frac{\sigma_t}{[\sigma_s]}, \quad (14)$$

где $[\sigma_s]$ — прочность пород на одноосное сжатие $[\sigma_c]$ или растяжение $[\sigma_p]$ в соответствии со знаком действующего в данной точке контура тангенциального напряжения σ_t (сжатие — плюс, растяжение — минус).

Решение задачи усложняется тем, что предел прочности на растяжение значительно меньше предела прочности на сжатие $[\sigma_p] \ll [\sigma_c]$, а если порода слоистая (а это, как правило, практически всегда), то ей присуща прочностная анизотропия, т. е. все её физико-механические, в том числе и прочностные, показатели зависят от направления действующих напряжений относительно слоистости.

ЛНКР ω^* (14) позволяет удобно описать характерные особенности разрушения породы при действии на неё напряжений различных знаков. Оказывается, возможны несколько механизмов разрушения в зави-

симости от знака напряжений и их соотношения с прочностью пород:

1) $-1 < \omega^* < 1$ — разрушение отсутствует, контур устойчив;

2) $1 < \omega^*$ — породный контур разрушается от сжатия по двум возможным механизмам, а именно:

2.1) разрушение путём образования и роста трещин сдвига (они первичны) с последующим развитием трещин отрыва, параллельных главному напряжению σ_t ;

2.2) первичны трещины отрыва вдоль направления главного сжимающего напряжения σ_t с образованием расслоения пород вдоль контура и их разрушением в результате потери устойчивости (продольно-поперечный изгиб) слоёв;

3) $\omega^* < -1$ — разрушение происходит по двум иным механизмам:

3.1) разрушение бегущими трещинами разрыва перпендикулярно направлению растягивающих напряжений при условии $\sigma_t < \sigma_p < 0$;

3.2) образование трещин разрыва от действия растягивающего напряжения $\sigma_z = \nu \cdot \sigma_t < \sigma_p < 0$ по нормали к нему, что формирует раскол породы двумя взаимно перпендикулярными системами разрывных трещин.

Таким образом, при разрушении пород вокруг ГВ неизбежно будут реализоваться различные механизмы развития ПГД, а их описание и прогноз устойчивости будут существенно отличаться.

Механизмы разрушения породного контура показывают, от каких именно напряжений, с какой интенсивностью происходит разрушение и какого вида трещины будут при этом преобладать в начальный и последующие моменты времени.

Конечно, предложенная выше классификация механизмов разрушения должна быть продолжена, поскольку для корректного решения задачи следует рассматривать сочетание двух ЛНКР ω_t^* и ω_x^* для

окружного σ_t и продольного σ_x напряжений, что будет отражено в последующей публикации.

5 Паспорт устойчивости породного контура ГВ

Чтобы определить, на каком участке контура и по какому механизму начнёт развиваться разрушение пород, необходимо построить паспорт устойчивости породного контура ГВ на его развёртке по тангенциальному углу θ в координатах θ, ω^* .

Паспорт устойчивости ГВ учитывает соотношение напряжений и прочности в каждой точке породного контура и показывает изменение критерия разрушения ω^* на развёртке контура ГВ по текущей координате (аффиксу) θ . По сути, это графическое представление зависимости

$$\omega^* = f(\theta), \quad (0 \leq \theta \leq 2\pi). \quad (15)$$

На рисунке 6 представлен паспорт устойчивости ГВ на развёртке контура в координатах θ, ω^* .

Поскольку исходное поле напряжений вокруг прямоугольной формы ГВ обладает, как видно из рисунков 3 и 5, двумя осями симметрии, а породный массив однороден, то паспорт устойчивости построен только для первого квадранта развёртки $0 \leq \theta \leq 90^\circ$, а остальные три квадранта будут такими же. Из графика видно, что вся область, в соответствии с критерием разрушения ω^* , разделена на три зоны:

- 1) устойчивости ($-1 < \omega^* < 1$);
- 2) разрушения от сжатия ($1 < \omega^*$);
- 3) разрушения от растяжения ($\omega^* < -1$).

Участки разрушения породного контура от сжатия сосредоточены возле углов ГВ $30 \leq \theta \leq 40^\circ$. Разрушение от растяжения следует ожидать на горизонтальных участках породного контура (кровля и почвы ГВ) в пределах $50 \leq \theta \leq 130^\circ$ и $230 \leq \theta \leq 310^\circ$. Остальные участки контура, главным образом бока ГВ, сохраняют устойчивость.

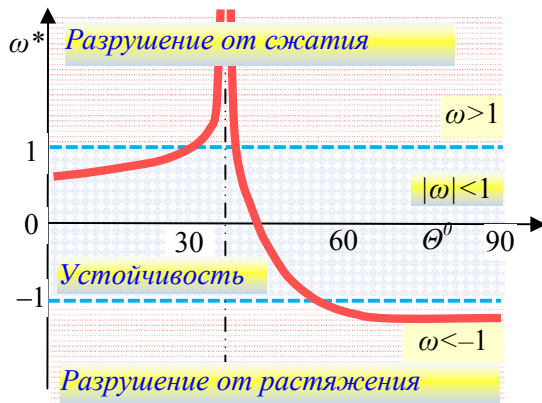


Рисунок 6 Паспорт устойчивости ГВ с прямоугольным контуром

Отметим, что в более общем случае, когда не выдержаны принятые ограничительные идеализации (изотропность, однородность и пр.), паспорт устойчивости усложняется. В частности, нарушается симметричность поля напряжений вокруг ГВ, причём анизотропия прочности пород эту несимметричность усугубляет. Поэтому паспорт прочности для большинства горных выработок необходимо строить на развёртке всего контура ГВ, т. е. с учётом всех четырёх квадрантов $0 \leq \theta \leq 360^\circ$.

6 Кинетика изменения устойчивости пород и фронта хрупкого разрушения

Поскольку разрушение породного контура происходит на разных участках выработки при различных значениях критерия разрушения и видах напряжённого состояния пород на контуре, последовательность и механизмы развития трещин вглубь массива пород будут значительно отличаться. Во-первых, это происходит из-за разных механизмов разрушения пород от растяжения и сжатия. Во-вторых, исходя из физического смысла ЛНКР ω^* , следует ожидать существенную разницу в моментах начала и скоростях зарождения, развития и распространения трещин растяжения и сжатия. На тех участках породного контура, где ЛНКР ω^* выше, время начала разрушения будет меньше, а скорости потери сплошности породы — выше, и эта

зависимость будет в общем случае нелинейной во времени и пространстве, т. е. с ускорением или замедлением.

В частности, исходя из физико-механической трактовки разрушения, можно достаточно обоснованно предположить, что время начала t^* и скорость V^* движения фронта хрупкого разрушения (ФХР) породы в данной локальной точке контура будут зависеть от критерия ЛНКР ω^* и его производных по времени $\dot{\omega}^* = d\omega^*/dt$, $\ddot{\omega}^* = d^2\omega^*/dt^2$ и т. д. Искомые параметры движения ФХР подчиняются интегро-дифференциальным, скорее всего неявного вида, функциональным зависимостям:

$$t^* = F_t \left[(|\omega^*|, \dot{\omega}^*, \ddot{\omega}^*, R_t) \right],$$

$$(|\omega^*| < 1 \Rightarrow t^* \rightarrow \infty),$$

$$V^* = F_V \left[(|\omega^*|, \dot{\omega}^*, \ddot{\omega}^*, R_V) \right],$$

$$(|\omega^*| < 1 \Rightarrow V^* = 0),$$
(16)

где R_t, R_V — набор размерных реономных параметров и показателей, определяемых экспериментально и характеризующих реологические свойства и поведение материала в изменчивых неравновесных полях НДС.

В выражении (16) заложено условие, что разрушение начинается при $|\omega^*| \leq 1 \Rightarrow t^* \rightarrow \infty$ и $V^* = 0$ и только когда критерий ЛНКР станет больше 1. При этом оказывается, что в каждой точке контура выработки время начала t^* и скорость V^* движения фронта хрупкого разрушения будет разной, что ведёт к образованию далеко не очевидных форм областей разрушения вокруг ГВ. К сожалению, данная сторона развития процессов ПГД во времени и пространстве выпала из поля зрения большинства исследователей и поэтому нуждается в глубоком изучении.

Опираясь на решение уравнений (16), можно дополнить паспорт устойчивости, который представляет устойчивость ГВ в статике, более глубокими и информативно важными для практических целей сведениями о кинетике развития разрушения окружающего массива пород. Для этого следует, придерживаясь предложенной методики, построить графики начала разрушения и скорости движения ФХР в координатах (t^*, θ) , (t^*, ω^*) , (V^*, θ) , (V^*, ω^*) .

Задача о движении ФХР в окрестности ГВ принадлежит к новому классу нелинейных задач кинетики ПГД с неголономными краевыми условиями. Такие задачи горной геомеханики в кинетической постановке и даже в физике твёрдого тела до сих пор не рассматривались. Существующие компьютерные программы непригодны для решения таких задач. Это обусловлено тем, что даже при начальном зарождении трещин, предшествующих развитию разрушения, физико-механические показатели пород (прочностные, упругие, реологические и др.) претерпевают изменение, что, в свою очередь, вызывает ответное изменение НДС пород, окружающих выработку.

Согласно принципу Ле Шателье — Брауна, если на систему, находящуюся в устойчивом равновесии, воздействовать извне, изменяя какое-либо из условий равновесия, то в ней усиливаются процессы, направленные в сторону противодействия изменениям и стремления к равновесию. Именно так и реагирует породный массив как механическая система вокруг ГВ, когда возникает концентрация напряжений, приводящая к развитию и накоплению дефектов и трещин при разрушении.

Рассмотрим эти процессы с позиций реологической микромеханики деформирования и разрушения пород [9]. В начальный период образования полости в породах (например, при взрывной проходке ГВ) возникают упругие поля концентрации напряжений и деформаций. Немедленно в породах идёт стохастический процесс зарождения и роста микродефектов, что со-

провождается излучением волн различной природы (электромагнитных, ультразвуковых, акустических и др.) и интенсивности. Возникают макроэффекты в виде деформации ползучести, снижения модулей упругости и повышения коэффициента Пуассона, которые можно измерить экспериментально. Процессы появления и роста микродефектов в породе можно с полным правом рассматривать как начальные стадии её разрушения в виде снижения показателей её прочности.

Снижение модулей деформации вокруг выработки за счёт микротрещиноватости происходит тем быстрее, чем большая концентрация напряжений возникает по радиусу и окружающему направлению. В свою очередь, снижение деформационных модулей влечёт за собой уменьшение концентрации напряжений вокруг ГВ, что приводит к двум важным последствиям:

- вдоль породного контура происходит выравнивание (сглаживание) неравномерности напряжений: их максимальные пики уменьшаются, а на участках, где напряжения были незначительны, происходит их постепенное увеличение;

- аналогичные процессы происходят по радиальному направлению: по мере удаления вглубь массива концентрация напряжений и прочностные свойства уменьшаются с затухающей скоростью.

В отличие от хрупкого разрушения в неизменном автотомодельном поле напряжений, здесь мы будем наблюдать быстро затухающие и взаимно замедляющие друг друга процессы снижения механических свойств (деформационных и прочностных) и концентрации напряжений. Общая картина будет отражать стремление системы выровнять неравномерности распределения напряжений и скоростей движения ФХР. Даже вокруг квадратной выработки со значительной концентрацией напряжений в углах (рис. 3) очертание зоны предельного деформирования пород по мере её удаления от контура будет стремиться к округлой форме.

Следовательно, получают объяснение те особенности ПГД в ГВ, которые связаны с меньшим, чем предсказывает линейная теория, влиянием неравномерностей свойств, состояний и структуры горных пород. Становится объяснимой большая длительность деформационных процессов вокруг выработки и неравновесное во времени состояние зоны запредельных деформаций с радиально неравномерной прочностью разрушенных пород.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что попытки прогнозирования процессов ПГД вокруг выработки, основанные на использовании единообразного подхода и универсального математического алгоритма для описания столь сложных и разнонаправленных процессов, заранее обречены на неудачу и должны быть отвергнуты.

Паспорт устойчивости ГВ позволяет судить об ожидаемом поведении породного контура, выделить на нём устойчивые, предельные и неустойчивые участки и даже оценить по уровню ЛНКР сравнительную скорость движения фронта хрупкого разрушения вглубь массива пород.

Однако для получения практических выводов об устойчивости ГВ на стадиях её проектирования, сооружения и эксплуатации необходимо получить достаточно достоверную совокупность начальных данных об исходном поле напряжений и прочностных свойств пород. К сожалению, исследовательские и изыскательские работы по получению исходных данных в настоящее время проводятся в крайне ограниченных объёмах, а подземные работы оказались без научного сопровождения, как в средние века.

Во многом, как и ранее, ориентирами при ведении горных работ остаются интуиция и производственный опыт, отражённые в многочисленных нормативных документах, основанных на эмпирическом подходе, достоверность которых оставляет желать лучшего. Ползучий эмпиризм, ещё довлеющий до сих пор в горной геомеханике, оказывается непригодным при изменении горнотехнических и горно-

геологических условий, что становится источником неверных инженерных решений, аварий и несчастных случаев.

Значит, назревшей проблемой для горной промышленности является нормативный запрет ведения горных работ без их научного обоснования, сопровождения и контроля компетентными исследовательскими и экспертными организациями.

Выводы

Проведённые исследования позволили получить следующие результаты:

1. Уровень обоснованности и надёжности существующих методов прогнозирования ПГД недостаточен и нуждается в развитии в направлении учёта многообразия форм ПГД в условиях существенной физической и геометрической нелинейности расчётных схем.

2. Предложена обобщённая расчётная схема плоского напряжённого и плоского деформированного состояния массива горных пород на породном контуре горной выработки.

3. Получен тензор напряжений на контуре горной выработки и показано, что главной неизвестной является окружная компонента тензора напряжений.

4. Доказана необходимость использования локального нормированного критерия разрушения (ЛНКР), с его помощью впервые установлены все возможные принципиально различные механизмы разрушения пород на контуре ГВ.

5. Обоснована целесообразность и практическая важность построения паспорта устойчивости горных выработок для определения наиболее опасных участков породного контура по разрушению.

6. Впервые поставлена и сформулирована задача кинетики изменения устойчивости пород и параметров движения фронта хрупкого разрушения вокруг горной выработки.

7. Сформулирован новый класс задач горной геомеханики о движении ФХР с учётом физической нелинейности, обусловлен-

ной влиянием снижения деформационно-прочностных свойств горных пород на их напряжённо-деформированное состояние.

Задачи дальнейших исследований состоят в повышении достоверности и информативности исходных данных о свой-

ствах горных пород и их НДС, решении нового класса задач статики и кинетики фронта хрупкого разрушения и образования зоны запредельных деформаций при сооружении горных выработок различного назначения.

Библиографический список

1. Протодьяконов, М. М. Давление горных пород и рудничное крепление [Текст] / М. М. Протодьяконов. — [2 изд.]. — М.-Л. : Госнаучтехиздат, 1931. — Ч. 1. — 104 с.
2. Цимбаревич, П. М. Механика горных пород [Текст] / П. М. Цимбаревич. — М. : Углетехиздат, 1948. — 184 с.
3. Слесарев, В. Д. Механика горных пород и рудничное крепление [Текст] / В. Д. Слесарев. — М. : Углетехиздат, 1948. — 303 с.
4. Вопросы теории горного давления [Текст] : сб. науч. переводов / под ред. А. А. Борисова. — М. : Госгортехиздат, 1961. — 229 с.
5. Фадеев, А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике [Текст] / А. Б. Фадеев. — М. : Недра, 1987. — 221 с.
6. Численные методы расчётов в практической геотехнике [Текст] : Сб. статей междунаучно-технич. конф. / СПбГАСУ. — СПб, 2012. — 398 с.
7. Литвинский, Г. Г. Закономерности влияния неосесимметричных факторов на формирование зоны неупругих деформаций в горных выработках [Текст] / Г. Г. Литвинский // Горное давление в капитальных и подготовительных выработках : сб. науч. тр. — Новосибирск : ИГД СО АН СССР, 1979. — С. 22–27.
8. Литвинский, Г. Г. Горное давление на малых и больших глубинах разработки [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2012. — № 37. — С. 5–19.
9. Литвинский, Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов [Текст] : монография / Г. Г. Литвинский. — Донецк : Норд-Преес, 2008. — 207 с.

© Литвинский Г. Г.

**Рекомендована к печати зам. директора по научной работе
РАНИМИ МОН ДНР, д.т.н., проф. Дрибаном В. А.,
д.т.н., проф., зав. каф. РМПИ ДонНТУ Петренко Ю. А.**

Статья поступила в редакцию 25.02.20.

д.т.н., проф. Литвинський Г. Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ПАСПОРТ СТІЙКОСТІ ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ: СТАТИКА І КІНЕТИКА

Розглянуто еволюцію системи знань у гірській геомеханіці від повзучого емпіризму до сучасних математичних моделей. Запропоновано послідовність вирішення геомеханічних завдань щодо прогнозу та забезпечення стійкості гірничої виробки (ГВ). Із загальних позицій теорії пружності вивчено задачу статики про напружено-деформований стан (НДС) навколо ГВ. Введено інтегральний безрозмірний параметр — локальний нормований критерій руйнування ω^* (ЛНКР). Вперше встановлено кілька принципово різних механізмів руйнування порід в залежності від ЛНКР. Дано алгоритм побудови паспорта стійкості ГВ. Вперше поставлено і сформульовано проблему кінетики зміни стійкості порід і параметрів руху фронту крихкого руйнування, що дозволяє перейти до вирішення нового класу завдань гірської геомеханіки.

Ключові слова: гірнича виробка, стійкість, гірничий тиск, методи прогнозу, напружено-деформований стан, критерій руйнування, механізми руйнування, паспорт стійкості, статика і кінетика руйнування.

Doctor of Technical Sciences, Prof. Litvinsky G. G. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

PASSPORT OF THE STABILITY OF MINE WORKING: STATICS AND KINETICS

The evolution of knowledge system in rock geomechanics from creeping empiricism to the modern mathematical models is studied. The sequence of solving the geomechanical problems offers on prediction and providing the stability of mine working (MW). From general positions of the elasticity theory, the task of statics about the stress-strain state (SSS) around MW is studied. An integral dimensionless parameter — local rationed criterion of destruction ω^ (LRCD) is introduced. For the first time some fundamentally different mechanisms of destruction of rock contour MW depending on LRCD were set. The algorithm to construct the passport of MW stability is given. There have been newly set and defined the problem of kinetics of changing the stability of rocks and parameters of motion of the front of fragile destruction, which allows passing to the decision of a new class of tasks of mining geomechanics.*

Key words: mine working, stability, rock pressure, prediction methods, stress-strain state, fracture criterion, fracture mechanisms, stability passport, static and fracture kinetics.