

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Г.Г. Литвинский

УСТОЙЧИВОСТЬ ПОРОДНЫХ ОБНАЖЕНИЙ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

*Модуль 3. Методические указания
к изучению курса "Механика подземных сооружений"
(для студентов горных специальностей)*

*У т в е р ж д е н о
на заседании кафедры
«Строительные геотехнологии»
Протокол N 3 от 12.04.13.*

Алчевск ДонГТУ 2013

МОДУЛЬ 3. УСТОЙЧИВОСТЬ ПОРОДНЫХ ОБНАЖЕНИЙ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

3.1. ПАСПОРТ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Паспорт устойчивости породных обнажений горных выработок является расчетным обоснованием для прогнозирования форм проявлений горного давления и составления паспорта крепления.

Паспорт устойчивости представляет собой совокупность графических и расчетных материалов по сопоставлению эпюр напряженного состояния и прочности на контуре горной выработки и позволяет судить о степени устойчивости и характере разрушения различных участков контура и выработки в целом.

Для суждения об устойчивости пород на контуре горной выработки необходимо сравнить действующие в каждой его точке тангенциальные напряжения с прочностью породы на одноосные сжатие или растяжение.

Определение напряжений на контуре горной выработки путем решения задачи теории упругости весьма сложно и практически недоступно для рядового горного инженера. В ДонГТУ разработан для этого инженерный метод расчета.

До начала разрушения пород воздействие установленной в горной выработке крепи на породный контур крайне незначительно по сравнению с действующими в массиве напряжениями. Поэтому с полным правом можно пренебречь взаимодействием крепи с упругим массивом горных пород и считать нормальные (радиальные) и касательные напряжения на контуре равными нулю, а сами породы находящимися в плоскодеформированном состоянии. Чтобы судить об устойчивости контура выработки, достаточно знать лишь тангенциальные напряжения σ_θ . Компонента напряжений, направленная вдоль оси выработки на ее контуре σ_z , определяется по известным радиальным и тангенциальным напряжениям из обобщенного закона Гука:

$$\varepsilon_z^0 = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)] = \frac{\sigma_z^0}{E} = const, \quad (3.1)$$

где ε_z^0 , σ_z^0 - z компоненты исходных полей деформаций и напряжений в массиве, откуда считая известными $\sigma_r = 0$ и σ_θ , можно определить третью компоненту σ_z :

$$\sigma_z = \nu\sigma_\theta + \sigma_z^0. \quad (3.2)$$

Используя эвристический подход, в ДонГТУ предложен простой и доступный метод определения напряжений на контуре выработки произвольной выпуклой формы при любом исходном нагружении массива горных пород.

Сущность разработанного в ДонГТУ метода определения напряжения на контуре незакрепленной выработки основана на установленной линейной зависимости тангенциальных напряжений от приведенной кривизны контура выработки

$$\sigma_\theta = a_1 + a_2\chi_i; \quad \chi_i = (R_i^3/R_i^k)^{2/3}, \quad (3.3)$$

где a_1 , a_2 - численные коэффициенты, зависящие от исходного поля напряжений в массиве и геометрии выработки;

χ_i - приведенная кривизна контура в данной i-й точке контура выработки;

R_i^3 , R_i^k - радиусы кривизны в i-й точке контура соответственно эллипса сравнения и выработки.

С помощью метода вариации формы границы вначале проектный контур выработки заменяют эквивалентным эллиптическим (или эллипсом сравнения), а затем во втором приближении учитывают местные отклонения реального контура от эллипса сравнения с помощью приведенной кривизны контура. Для этого определяют приведенную кривизну контура в виде функции отношения в данной точке радиусов кривизны реального контура и эллипса сравнения.

Эллипс сравнения - это эллипс с той же площадью и соотношением полуосей, что и у реального контура выработки. Погрешность расчетного метода не превышает 10 - 15%. Для выработок круговой и эллиптической форм, решение дает точные результаты. Алгоритм определения напряжений приведен в п. 2.3.

Эпюру прочности горных пород для паспорта устойчивости следует строить по данным лабораторных испытаний образцов в соответствии с утвержденными методиками. При этом учитывают

коэффициенты, обеспечивающие переход от прочности породы в образце к прочности породы в массиве:

$$\sigma^M = K_w \cdot K_t \cdot K_c \cdot \sigma^{обр}, \quad (3.4)$$

где σ^M , $\sigma^{обр}$, - показатель прочности породы на одноосные сжатие (С) или растяжение (Р) соответственно в массиве и образце;

K_w - коэффициент размокания пород, $K_w = 0,2...1,0$;

K_t - коэффициент снижения прочности при длительном нагружении породы, $K_t = 0,7...0,9$;

K_c - коэффициент структурного ослабления пород (трещинами), $K_c = 0,3...1,0$.

При определении устойчивости породных обнажений ответственных подземных сооружений прочность пород необходимо представлять в виде полярной диаграммы (по Г.Н.Кузнецову), которая позволяет учитывать наличие различных систем трещин и поверхностей ослабления в каждом пласте породы. При этом коэффициент K_c в формулу (3.4) вводить не следует (почему?).

Для построения полярной диаграммы прочности следует с помощью испытаний определить прочность породы перпендикулярно и параллельно напластованию на одноосные сжатие σ_c^\perp , σ_c^\parallel и растяжение σ_p^\perp , σ_p^\parallel . Ориентировочные значения показателей прочности приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 Ориентировочные значения показателей и механических

Показатель	Обозначение	Тип породы		
		аргиллит	алевролит	песчаник
1. Прочность на одноосное сжатие, МПа	σ_c^\perp	20/40	30/70	40/120
2. Соотношения прочностей к прочности σ_c^\perp :				
на сжатие	$\sigma_c^\parallel / \sigma_c^\perp$	0,3/0,6	0,4/0,8	0,5/0,9
на растяжение	$\sigma_p^\parallel / \sigma_p^\perp$	0,06/0,1	0,1/0,15	0,1/0,2
под $\angle 45^\circ$ на сжатие	$\sigma_c^{45} / \sigma_c^\perp$	0,2/0,4	0,3/0,5	0,4/0,8
3. Коэффициенты: размокания	K_w	0,1/0,7	0,2/0,8	0,3/1,0

Продолжение табл. 3.1

структурного ослабления длительной прочности	K_c	0,3/0,8	0,4/0,8	0,4/1,0
	K_t	0,6/0,8	0,7/0,9	0,8/0,9
4. Угол внутреннего трения, град	ρ	18/22	22/27	27/33
5. Модуль деформации, МПа/10 ⁴	E	1/2	2/4	3/5
6. Коэффициент Пуассона	ν	0,2/0,4	0,2/0,3	0,1/0,3

*) Примечание: в числителе указано нижнее, а в знаменателе верхнее значение показателя.

Рассмотрим расчет полярной диаграммы прочности. Согласно теории прочности Кулона-Мора, условие прочности на сдвиг на произвольной поверхности ослабления можно записать в виде неравенства (рис. 3.1)

$$\tau_{nt} \leq f_n \sigma_n + K_n, \quad (3.5)$$

где τ_{nt} , σ_n - касательная и нормальная компоненты напряжений на поверхности;

K_n - коэффициент сцепления породы на поверхности ослабления;

f_n - коэффициент внутреннего трения породы.

Учитывая известные соотношения о напряжениях на произвольной наклонной под углом α площадке при одноосном нагружении образца напряжением σ_α , можно записать

$$\sigma_n = \sigma(\alpha) \cos^2 \alpha; \quad \tau_{nt} = \sigma(\alpha) \sin \alpha \cdot \cos \alpha. \quad (3.6)$$

Подставляя в (3.5), получим зависимость разрушающих напряжений на поверхности ослабления

$$\sigma(\alpha) = 2K_n (\sin 2\alpha + 2f_n \cos^2 \alpha)^{-1}. \quad (3.7)$$

В данной и последующих формулах знак (-) соответствует сжатию, а (+) - растяжению породы.

Для растягивающих напряжений следует выполнить, кроме того, проверку разрушения породы на прямой разрыв, что дает условия:

$$\sigma_p(\alpha) \geq \sigma_p^\perp \cos^2 \alpha; \quad \sigma_p(\alpha) \geq \sigma_p^\parallel \cos^2 \alpha, \quad (3.8)$$

где σ_p^\perp , σ_p^\parallel - пределы прочности породы на одноосное растяжение перпендикулярно и параллельно напластованию, $\sigma_p^\perp = \sigma_p(0^\circ)$, $\sigma_p^\parallel = \sigma_p(90^\circ)$.

Если условия (3.8) не выполняются, то разрушение произойдет сдвигом по плоскости ослабления согласно зависимости (3.7). Граничные углы α_1^* и α_2^* и приложения растягивающего напряжения $\sigma_p(\alpha^*)$ относительно плоскости ослабления можно определить, приравняв (3.7) и (3.8). Сделайте это самостоятельно. Ответ:

$$\operatorname{tg} \alpha_1^* = K_n / \sigma_p^\perp - f_n; \quad \operatorname{tg} \alpha_2^* = K_n / \sigma_p^\parallel - f_n. \quad (3.9)$$

Для случая сжимающих напряжений $\sigma_c(\alpha)$, приложенных под углом α к напластованию, также существуют два граничных угла α_1^* и α_2^* . Если угол α приложений относительно нормали к напластованию (рис. 3.1) удовлетворяет неравенству $\alpha_1^* < \alpha < \alpha_2^*$, то разрушение происходит сдвигом по поверхности ослабления, в противном случае эта поверхность не оказывает влияние на прочность породы и она разрушается как однородная. Определите самостоятельно граничные значения этих углов из неравенств $\sigma_c(\alpha) < \sigma_c^\perp$ и $\sigma_c(\alpha) < \sigma_c^\parallel$ (рис. 3.2).

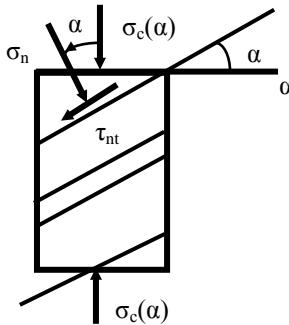


Рисунок 3.1 - Схема испытания породы

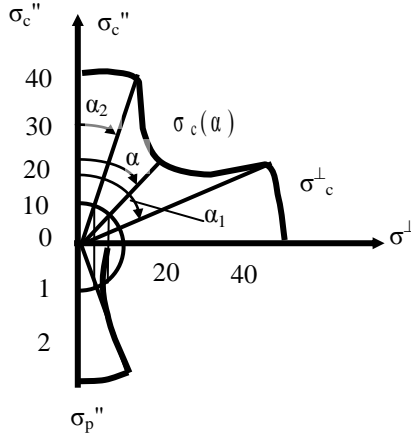


Рисунок 3.2 - Полярная диаграмма прочности

По результатам лабораторных испытаний (рис. 3.1) определяют прочность на сжатие и растяжение (\perp , \parallel , $\angle 45^\circ$) и строят диаграмму прочности (рис. 3.3) для каждого пласта пород, пересекаемого контуром выработки, для чего используют формулу

$$\sigma(\alpha) = \sigma(\alpha_1) \frac{\cos \alpha_1 \sin(\alpha_1 \mp \rho)}{\cos \alpha \sin(\alpha \mp \rho)}, \quad (\alpha_1^* < \alpha < \alpha_2^*), \quad (3.10)$$

где $\sigma(\alpha)$ - показатель прочности на одноосные сжатие (-) или растяжение (+) под углом α к плоскости ослабления;

$\sigma(\alpha_1)$ - известный из эксперимента показатель прочности на одноосные сжатие или растяжение под углом α_1 к той же плоскости ослабления (чаще всего берут $\alpha_1 = 45^\circ$);

ρ^* - угол внутреннего трения на плоскости ослабления;

α_1^* , α_2^* - предельные углы участка полярной диаграммы, где справедлива зависимость (3.10).

На основании известных полярных диаграмм строят эпюру прочности на контуре выработки. Для этого измеряют угол α между напластованием пород и касательной к контуру. По значению этого угла на полярной диаграмме определяют соответствующую прочность

$\sigma(\alpha)$, которую откладывают на развертке контура выработки и соединяют полученные точки, что дает эпюру прочности.

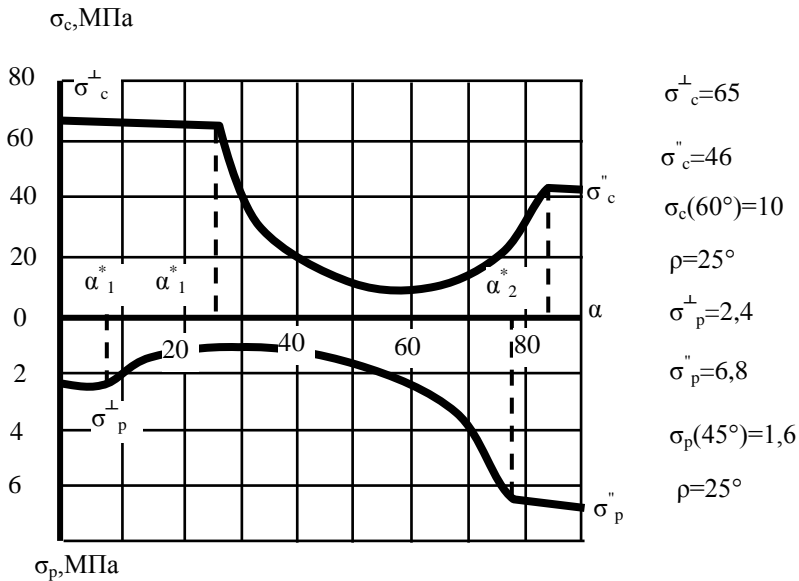


Рисунок 3.3 - Диаграмма прочности алевролита

В качестве примера оформления приведен паспорт устойчивости породного контура горной выработки (рис. 3.4), пройденной по алевролиту (рис. 3.3). Исходные данные приведены на расчетной схеме. Основные результаты отражены в таблице расчетов, а конечным итогом расчетов является график локального критерия разрушения ω_* выработки.

Локальный критерий разрушения ω_* показывает, во сколько раз действующие напряжения превышают прочность породы в данной точке выработки;

$$\omega_{*i} = f_i(\sigma_{ki})/F_i(C_m), \quad (3.11)$$

где $f_i(\sigma_{ki})$ - функция характеризующая напряженное состояние в σ_m в i -й точке;

$F_i(C_m)$ - функция, зависящая от параметров прочностных свойств C_m породы в той же точке.

Для пород контура незакрепленной горной выработки

$$\omega_{*i} = \sigma_i / [\sigma]_i, \quad (3.12)$$

где σ_i - тангенциальное напряжение в i -й точке контура;

$[\sigma]_i$ - показатель прочности горной породы с учетом плоскостей ослабления в i -й точке контура.

Из (3.12) следует, что для сжимающих напряжений $\omega_{*}^{+} > 0$, а для растягивающих $\omega_{*}^{-} < 0$. Преимуществом графика локального критерия разрушения ω_{*} является его наглядность (см. рис. 3.4). Те участки контура, где $|\omega_{*}| < 1$, будут устойчивыми, разрушение на них пород не происходит. Там, где $\omega_{*}^{+} > 1$, будет происходить разрушение от сжимающих напряжений, а при $\omega_{*}^{-} < -1$ - от растягивающих напряжений. Величина критерия $|\omega_{*}|$ по модулю характеризует степень опасности или интенсивность процесса разрушения пород на контуре.

Следует обратить внимание на то, что паспорт устойчивости справедлив лишь для начального (исходного) положения контура, когда разрушения еще не начались. При развитии разрушения пород форма контура выработки изменится и расчеты следует производить заново. Таким образом, в процессе разрушения пород устойчивость выработки непрерывно изменяется.

Результаты расчетов

N_i	R_i^k	R_i^p	χ_i	$\sigma_x=6,8$ f_x	$\sigma_y=18,2$ f_y	$\tau_{xy}=-6,8$ f_{xy}	σ_i	$[\sigma]_i$	ω_i^*
1	2,0	1,2	0,71	-0,95	3,04	0	48,9	45	1,1
2	2,0	1,9	0,97	0,75	1,29	4,04	1,1	8	0,14
3	2,0	2,8	1,25	2,81	-1,04	0	-0,2	11	-0,2
4	2,0	1,9	0,97	0,75	1,29	-4,04	56,1	45	1,25
5	2,0	1,2	0,71	-0,95	3,04	0	48,9	45	1,1
6	0	1,9	6	3,81	4,31	4,04	76,9	<45	>1
7	∞	2,8	0	1,43	-0,83	0	-5,4	4,5	-1,2
8	0	1,9	6	3,81	4,31	-4,04	132	<4,5	>3

Рисунок 3.4 - Паспорт устойчивости породного контура выработки

Проанализируйте график критерия разрушения на рис. 3.4, определите устойчивые и неустойчивые участки контура. Где будет идти разрушение наиболее интенсивно? Как будет изменяться форма контура, как это повлияет на распределение напряжений?

Рассмотрим с позиций паспорта устойчивости проблему выбора оптимальной формы выработки. Если оставить тот же критерий оптимальности $\omega_* = \text{const}$ по всему контуру выработки, что и в п. 2.2, то следует учитывать и изменение прочности по контуру выработки. Если принять равенство критериев ω_* в кровле, почве и боках выработки, то получим уже новую формулу для определения оптимальной формы выработки в виде эллипса с соотношением полуосей, равным

$$\frac{b}{a} = \sqrt{\frac{(S+1)^2(1-\lambda)^2}{16\lambda^2}} + \frac{S}{\lambda} + \frac{(S+1)(1-\lambda)}{4\lambda}, \quad (3.13)$$

где S - соотношение прочности пород в кровле и боках выработки

$$S = \sigma_c^{\text{кр}} / \sigma_c^{\text{б}},$$

λ - коэффициент бокового распора массива.

(Рекомендуется эту формулу доказать самостоятельно.)

Проанализируйте различные сочетания λ и S).

3.2. ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД ВОКРУГ ВЫРАБОТОК

Паспорт устойчивости горной выработки включает в себя анализ развития разрушения пород на контуре горной выработки и обоснованный прогноз схем проявлений горного давления.

Разрушение пород вокруг выработки происходит постепенно, развиваясь от контура в глубь массива. Особенности процесса разрушения определяют проявления горного давления и их можно прогнозировать на основе анализа паспорта прочности породного контура.

На контуре горной выработки (рис. 3.5) действуют в общем случае 3 главных напряжения: радиальное σ_r , тангенциальное σ_θ и вдоль оси выработки.

В зависимости от сочетания действующих главных напряжений на контуре выработки разрушение будет происходить по двум различным механизмам: отрывом (при растяжении) и сдвигом (при сжатии). Какой же механизм будет реализовываться, если главные напряжения окажутся различных знаков? Для этого следует построить круг О.Мора на паспорте прочности породы в рассматриваемой точке контура выработки (рис.3.6).

На диаграмме О.Мора следует представить паспорт прочности 1 с кругами прочности на одноосные сжатие (σ_c) 2 и растяжение (σ_p) 3. Если на контуре действуют напряжения различных знаков, $\sigma_z > \sigma_r = 0 > \sigma_\theta$, то для сочетания напряжений в виде круга 4 разрушение породы будет происходить сдвигом, для круга 5 - отрывом, а в случае круга 6 необходимо определить локальный критерий разрушения ω^* для растяжения и сжатия. В точке породного контура разрушения будет происходить по тому механизму, которому соответствует наибольший по модулю критерий $|\omega^*|$.

Будем считать, что:

при разрушении отрывом трещины растут в плоскости, перпендикулярной растягивающему напряжению;

при разрушении сдвигом плоскости скольжения проходят под углом $\alpha = 45^\circ - \rho/2$ к линии действия максимального главного напряжения и перпендикулярно площадке среднего по величине напряжения.

Разрушение сдвигом происходит под действием касательного напряжения τ_{nt} , которое зависит от максимальной разности главных напряжений $\Delta\sigma$:

$$\tau_{nt} = 0,5 \cdot \Delta\sigma \cdot \cos\rho. \quad (3.14)$$

Характер разрушения пород вокруг выработки зависит от того, какие напряжения дают максимальную разность $\Delta\sigma$. Рассмотрим возможные случаи разрушения.

а) Разрушение сдвигом от разности $\Delta\sigma = (\sigma_\theta - \sigma_r) > 0$ и касательного напряжения $\tau_{r\theta}$. Это самый распространенный случай, наблюдаемый в горизонтальных выработках. При осесимметричном распределении напряжений вокруг выработки образуются два

семейства поверхностей сдвига (рис. 3.7,а). Чтобы их построить, надо рассмотреть разрушение элементарного объема породы (рис. 3.7,б) и заметить, что линии разрушения (скольжения) пересекают радиус всегда под одним и тем же углом;

$$\beta = 90 - \alpha = 45^\circ + \rho/2, \quad (3.15)$$

что присуще в круглой выработке при $\lambda = 1$ логарифмическим спиралям. [Что будет в прямоугольной выработке?]

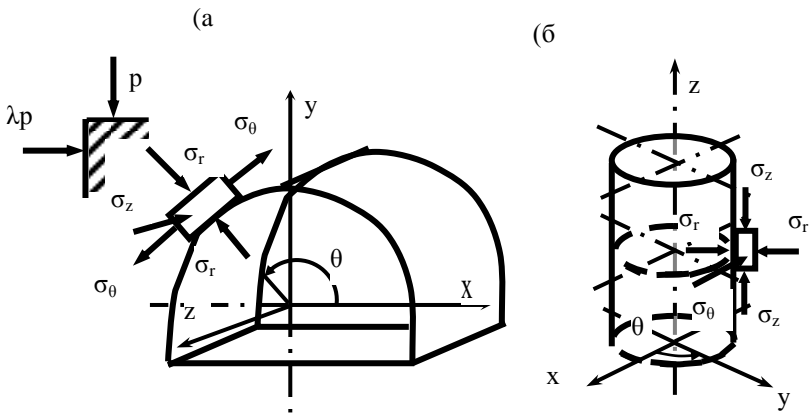


Рисунок 3.5 - Главные напряжения вокруг горизонтальной (а) и вертикальной (б) выработок

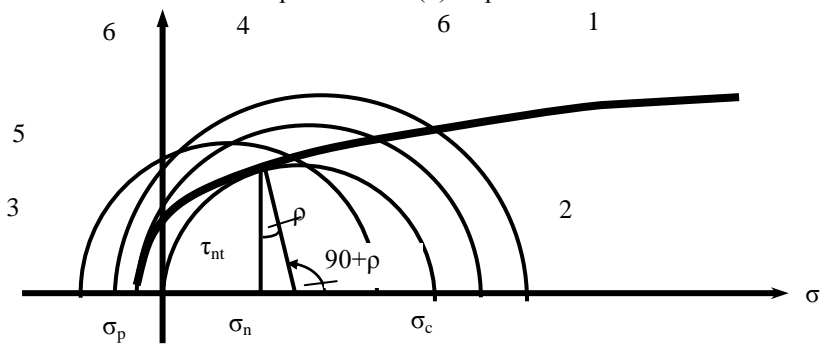


Рисунок 3.6 - Определение механизма разрушения на диаграмме О.Мора

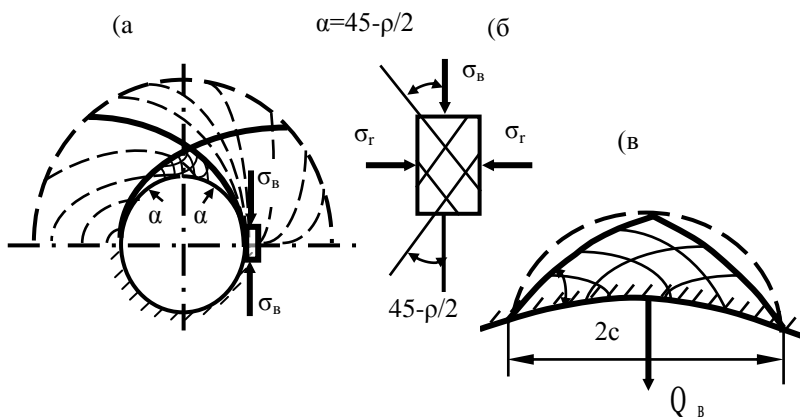


Рисунок 3.7 - Семейства поверхностей сдвига (а), разрушение элементарного объема породы (б) и схема вывалообразования (в)

Пересечение двух линий скольжения различных семейств в виде трещин может вызвать вывал в выработке ("купол"). Вес вывала Q_B легко оценить по известному из паспорта прочности размеру C разрушенного участка контура выработки

$$Q_B = V \cdot \gamma = S \cdot \gamma \cdot l = c^2 \operatorname{tg}(45^\circ - \rho/2) = c^2 / \sqrt{A}, \quad (3.16)$$

где V - объем вывала протяженностью l м;

γ - объемный вес породы, кН/м^3 ;

S - площадь вывала между поверхностями сдвига, м^2 ;

C - половина ширины вывала, м;

A - параметр угла внутреннего трения ρ породы.

$$A = (1 + \sin \rho) / (1 - \sin \rho) = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \rho/2).$$

[Рекомендуем доказать формулу (3.16)].

б) Разрушение отрывом от разности разности $\Delta \sigma = (\sigma_\theta - \sigma_r) < 0$ возможно, когда на контуре появляются растягивающие напряжения $\sigma_\theta < 0$, что наблюдается в горизонтальных и наклонных выработках при малых коэффициентах бокового распора массива. Трещины на контуре будут ориентированы перпендикулярно растягивающему напряжению

σ_{θ} , т.е. будут направлены по нормали к контуру горной выработки (рис. 3.8).

Трещины растяжения по мере своего роста меняют направление, оставаясь перпендикулярными границе фронта хрупкого разрушения, передвигающегося в глубь массива. Разрушение останавливается, когда на границе фронта хрупкого разрушения растягивающие напряжения σ_{θ} станут равными прочности породы на растяжение σ_p , т.е. $|\sigma_{\theta}| = \sigma_p$.

При этом возможны 3 случая (рис. 3.9): разрушение происходит в кровле, почве или в обоих направлениях.

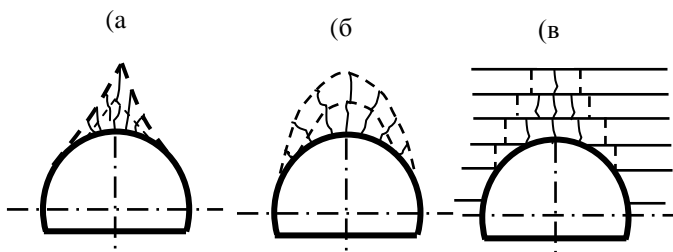


Рисунок 3.8 - Формы сводов естественного равновесия от трещин растяжения: а - стрельчатая; б - арочная; в - в слотистых породах

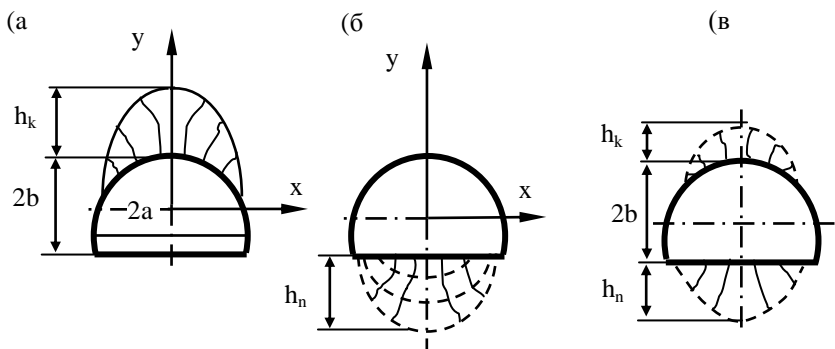


Рисунок 3.9 - Разрушение пород от растяжения на различных участках контура выработки: а - в кровле; б - в почве; в - двустороннее

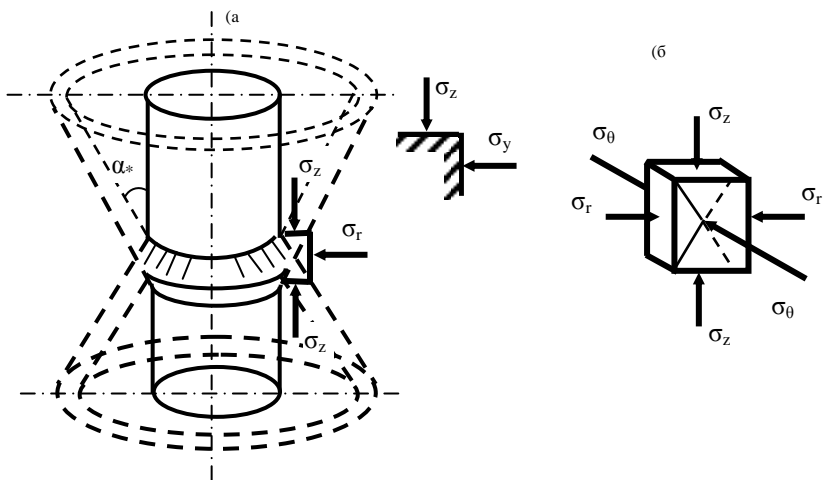


Рисунок 3.10 - Особенности разрушения породного контура коническим сколом: а - общий вид ствола и конических поверхностей сдвига; б - элементарный кубик породы на контуре

Размеры свода естественного равновесия

В предположении, что форма границы разрушения близка к эллиптической и пренебрегая взаимодействием разрушенных пород с окружающим массивом, можно получить простую формулу для определения размера этой зоны h_c . Для этого приравняем тангенциальные напряжения σ_θ в вершине образовавшегося эллипса прочности σ_p

$$\sigma_\theta^k = p[-1 + \lambda + \lambda(2b + h_c)/a] = -\sigma_p.$$

Отсюда высота свода h_c при его одностороннем образовании в кровле или почве выработки равна

$$h_c = a/\lambda(1 - \lambda - \sigma_p/p) - 2b. \quad (3.17)$$

Если $h_c < 0$, то разрушение отсутствует и свод не образуется. [Выведите формулу, подобную (3.17), для случая двустороннего сводообразования в выработке (см. рис. 3.9,в)].

Чтобы определить нагрузку на крепь от свода обрушения, необходимо определить его объем на 1м длины выработки. При эллиптической форме свода

$$G_{св} = \gamma S_{св} \cdot l = (\pi/2)\gamma h_c \cdot a. \quad (3.18)$$

[Определите вес свода обрушения другой формы (рис. 3.8,а,в)]. Сравните с подходом проф. М.М.Протождяконова, который предложил определить вес пород, оказывающих давление на крепь на протяжении 1м выработки и заключенных в своде естественного равновесия параболической формы, по формуле

$$G_c = \frac{4}{3} \gamma h_c a = \frac{4}{3} \gamma \frac{a^2}{f_c}, \quad (3.19)$$

где f_c - коэффициент крепости пород по Протождяконову.

Проанализируйте достоинства и недостатки обоих подходов, объясните подобие конечных формул.

в) Разрушение стенок стволов коническим сколом происходит при $\sigma_z > \sigma_\theta \geq \sigma_r$ от наибольшей разности главных напряжений $\Delta\sigma = (\sigma_z - \sigma_r) > 0$ и касательного напряжения τ_{zr} .

Если учесть, что $\sigma_z = \gamma H$ и на контуре $\sigma_\theta = 2\sigma_y = 2\lambda\gamma H$, то для разрушения коническим сколом, когда $\sigma_z > \sigma_\theta$, необходимо соблюдение условия $\lambda \leq 0.5$. (Продумайте, каким будет разрушение пород в стволе, если коэффициент бокового распора $\lambda \geq 0.5$). В стволе такое разрушение проявляется в виде опоясывающих стенки выколов породы, приуроченных, как правило, к пластам слабых пород.

В качестве упражнения сделайте чертеж подобного разрушения в горизонтальной выработке. Какие должны соблюдаться соотношения между компонентами исходного поля напряжений в массиве?

г) Разрушение пород на контуре по винтовым (геликоидным) поверхностям может наблюдаться, если $\sigma_y > \sigma_r = 0 > \sigma_\theta$ от наибольшей разности главных напряжений $\Delta\sigma = (\sigma_y - \sigma_\theta)$ и касательного напряжения $\tau_{y\theta}$.

Такое разрушение возможно, если выполняются условия $\sigma_y > \sigma_{cw}$ и $\sigma_\theta < |\sigma_p|$, т.е. когда не возникают трещины отрыва, перпендикулярные σ_θ . На криволинейном породном контуре возникают следы винтовых поверхностей скольжения 1, которые в трещиноватом массиве могут способствовать появлению вывалов 3 - пирамидальной формы. [Дайте чертеж "пирамиды", укажите ее размеры].

Интересно отметить родственность такого типа разрушения в горных выработках линиям Чернова-Людерса при растяжении стальных образцов на разрывных машинах. [В качестве упражнения дайте чертеж и анализ возникновения этих линий].

На рис. 3.12 приведены основные случаи разрушения породных обнажений горных выработок.

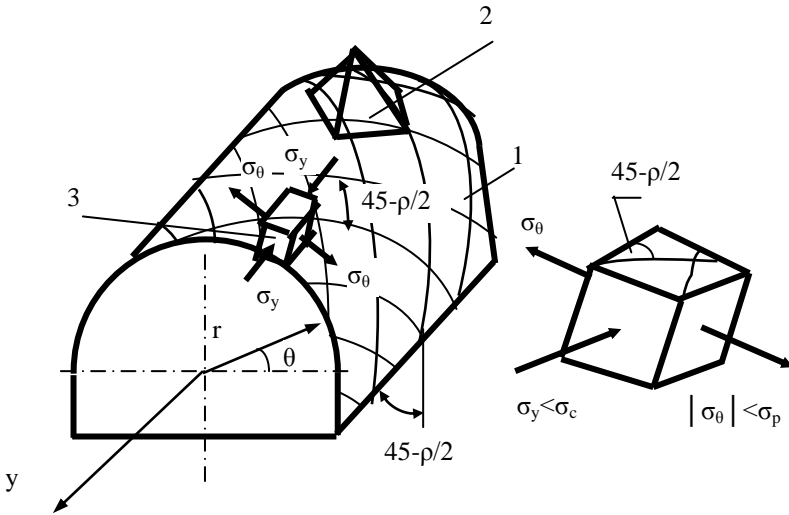


Рисунок 3.11 - Следы винтовых поверхностей скольжения на контуре выработки (1 - винтовые линии; 2 - элементарный кубик породы; 3 - вывал пирамидальной формы)

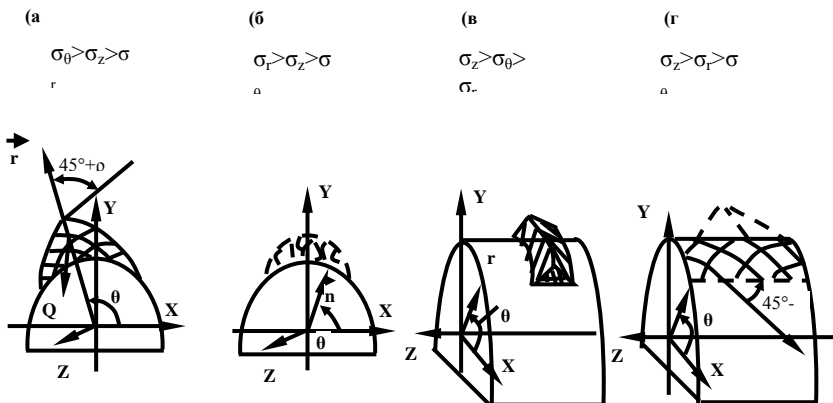


Рисунок 3.12 - Характерные формы разрушения пород в выработке: а) вывал; б) свод естественного равновесия; в) коническая и г) винтовая поверхности разрушения

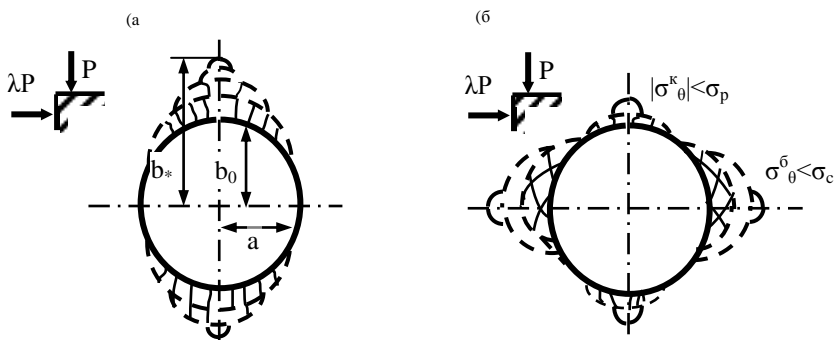


Рисунок 3.13 - Формоизменение породного контура в процессе разрушения от растягивающих (а) и сжимающих (б) напряжений

Можно попытаться оценить вес вывала пирамидальной формы, если известны размер $2c$ участка породного контура по периметру контура и углы наклона граней к основанию пирамиды. [Попробуйте сделать это].

Таким образом, существуют различные механизмы разрушения породных обнажений горных выработок, которые зависят от соотношения действующих напряжений в окрестности выработки. А

поскольку эти напряжения довольно сложным образом изменяются в зависимости от координат рассматриваемой точки (полярного угла и расстояния от контура), то и механизмы разрушения могут изменяться от точки к точке массива, в которых нарушается одно из условий прочности. Этим обусловлена чрезвычайная сложность процессов проявлений горного давления в подземных выработках.

3.3. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД В ВЫРАБОТКЕ

Возможные механизмы разрушения пород в выработке рассмотрены нами в статической постановке, т.е. без учета их развития вокруг выработки. Статическое рассмотрение позволило выявить и объяснить многообразие форм разрушения породного контура выработки. Однако без ответа остались важные вопросы: как развивается процесс разрушения; какие формы приобретает новый породный контур, если крепь отсутствует; как изменяется его устойчивость по мере развития разрушения? К сожалению, эти вопросы до настоящего времени не исследовались.

Проанализируем процесс разрушения горных пород под действием напряжений различных знаков. По мере развития разрушения происходит изменение формы выработки, что вызывает перераспределение напряжений не только на участке разрушения, но и на всем контуре выработки. Чтобы в этом убедиться, рассмотрим изменение напряжений в двух характерных точках контура круглой выработки - в кровле (почве) и боках (рис. 3.13):

$$\sigma_{\theta}^k = p(-1 + \lambda + 2\lambda b/a), \quad (3.20)$$

$$\sigma_{\theta}^b = p(1 - \lambda + 2a/b), \quad (3.21)$$

Если происходит разрушение контура под действием растягивающих напряжений, то, согласно (3.20), в кровле (и почве) выработки должно действовать растягивающее напряжение $\sigma_{\theta}^k < 0$, по модулю превышающее прочность на одноосное растяжение σ_p , т.е. соблюдается условие $|\sigma_{\theta}^k| > \sigma_p$. Разрушение приведет (см. рис. 3.13,а) к увеличению высоты b , что сразу изменит все напряжения вокруг выработки. В кровле и почве, согласно (3.20), напряжение σ_{θ}^k , которое

было отрицательным, по мере роста высоты b стремится к нулю $\sigma_{\theta}^k \rightarrow 0$, т.е. уменьшается. В боках выработки рост высоты b также приводит к уменьшению напряжений σ_{θ}^b . Таким образом разрушение, разрушение пород на контуре от растяжения способствует повсеместному уменьшению напряжений вокруг выработки. Как только напряжения в кровле в процессе разрушения уменьшатся до уровня прочности $|\sigma_{\theta}^k| \leq \sigma_p$, разрушение прекратится и выработка приобретает устойчивую форму.

При хрупком разрушении породного контура выработки от сжимающих напряжений он также будет менять свою форму, вызывая тем самым изменения концентрации напряжений. В обычном случае разрушение начинается в боках (почему?) и приводит к увеличению ширины выработки. Согласно (3.20) и (3.21) такое формоизменение контура приводит к возрастанию сжимающих напряжений в боках и растягивающих - в кровле и почве выработки. Следовательно, фронт хрупкого разрушения (ФХП) самоускоряется, что приводит к полному завалу и незакрепленной выработки. Если породы обладают способностью к пластическим деформациям, устойчивость выработки снижается менее заметно. В этом и другом случае возможно разрушение пород от возникающих растягивающих напряжений в кровле и почве выработки.

Эту логическую цепь доказательств можно записать кратко в символической форме. Для этого полезно ввести локальный нормированный критерий разрушения ω^* , который дает количественную оценку возможности разрушения в заданной точке:

$$\omega^* = \sigma \cdot \prod_{i=1}^n k_i / (\sigma_c \cdot \prod_{j=1}^m k_j), \quad (3.22)$$

где σ_n и σ_p - действующие напряжения (на контуре $\sigma_n = \sigma_{\theta}$) и прочность породы (на контуре σ_p или σ_c) в рассматриваемой точке;

k_i и k_j - коэффициенты, вводимые для учета влияния реальных условий соответственно на напряжения и прочность пород.

Если $\omega^* < 1$, то разрушение пород отсутствует, при условии $\omega^* > 1$ - наблюдается разрушение пород от сжатия, а если $\omega^* < -1$ - от растяжения. Поэтому модуль критерия $|\omega^*|$ дает представление о том, насколько интенсивно будет развиваться разрушение, а знак - какой у разрушения механизм, отрывом (-) или сдвигом (+).

Анализируя зависимость (3.20), механизм разрушения пород в кровле выработки можно условно записать в виде:

(В кровле и почве $|\sigma_{\theta}^k| > [\sigma_p]$ → разрушение от растяжения) → $(b \uparrow; a = \text{const}) \rightarrow (|\sigma_{\theta}^k| \downarrow \rightarrow [\sigma_p]; \sigma_{\theta}^B \downarrow) \rightarrow (a = \text{const}; b \uparrow \rightarrow \text{const}) \rightarrow$ (контур устойчив).

Процесс разрушения пород от сжатия в боках выработки, согласно (3.21) записываем символично в виде:

(в боках $\sigma_{\theta}^B > \sigma_c; |\sigma_{\theta}^k| < \sigma_p$) → $(b = \text{const}; a \uparrow) \rightarrow (\sigma_{\theta}^B \uparrow; \sigma_{\theta}^k \downarrow$ или $|\sigma_{\theta}^k| \uparrow) \rightarrow (aa \uparrow; b = \text{const}$ или $\uparrow) \rightarrow (\sigma_{\theta}^B \uparrow \uparrow; |\sigma_{\theta}^k| \rightarrow \sigma_p) \rightarrow$ (контур неустойчив).

Эти символичные цепочки следует научиться "озвучивать" в терминах механизма разрушения пород. [Подумайте, возможны ли другие механизмы разрушения? Составьте для них символичные формулы, используя обозначения: больше ($>$), меньше ($<$), равно ($=$), рост (\uparrow), снижение (\downarrow), следует (\rightarrow)].

Подводя итог проведенному анализу направленности процессов разрушения, следует отметить различие механизмов разрушения пород вокруг выработки. Но все их разнообразие основывается на двух фундаментальных закономерностях изменения устойчивости выработки и развития горного давления в сжатом массиве.

Первая фундаментальная закономерность: при разрушении породного контура от растягивающих напряжений возникают трещины разрыва вдоль максимальной компоненты исходного поля напряжений, условный размер (высота) выработки в этом направлении возрастает, что приводит к снижению концентрации напряжений по всему контуру, скорость фронта хрупкого разрушения уменьшается, разрушение самопроизвольно прекращается, выработка приобретает устойчивую форму

$$|\omega_*^-| > 1 > \omega_*^+ \quad \text{или} \quad |\omega_*^-| > \omega_*^+ > 1. \quad (3.23)$$

Вторая фундаментальная закономерность: при хрупком разрушении породного контура от сжимающих напряжений фронт хрупкого разрушения в виде трещин сдвига движется в направлении минимальной компоненты исходного поля напряжений, увеличивая условный размер (ширину) выработки в этом направлении, концентрация напряжений при этом возрастает, что увеличивает скорость ФХР и ускоряет разрушение на ранее устойчивых участках контура, выработка снижает устойчивость по мере развития

разрушения и происходит ее заполнение разрушенной породой вплоть до самоподбучивания (если отсутствует крепь).

$$\omega_*^+ > 1 > |\omega_*^-| \quad \text{или} \quad \omega_*^+ > |\omega_*^-| > 1. \quad (3.24)$$

Следовательно, закономерности разрушения породного контура могут быть положены в основу классификации устойчивости подземных выработок.

Классификация устойчивости выработок и развития горного давления базируются на анализе изменения локального нормированного критерия разрушения ω^* по знаку и величине при формоизменении контура в процессе разрушения. В этом главное отличие новой классификации от всех существующих, основанных на учете не причин, а следствий (смещений, давления); рассматривающих разрушение в статике, а не в развитии.

Сущность устойчивости пород в выработке состоит в следующем. Если в процессе разрушения пород происходит повсеместное уменьшение по модулю локального критерия $|\omega^*|$, то разрушение самопроизвольно остановится и новый контур выработки будет устойчив, при возрастании критерия $|\omega^*|$ вокруг выработки (или хотя бы на части ее контура) процесс разрушения приводит к снижению ее устойчивости.

Вторичными классификационными признаками, позволяющими выделить многочисленные подклассы и охватить все многообразие форм проявлений горного давления, являются:

а) модель поведения пород (хрупкая, пластичная, вязко-упругая и др.);

б) участок разрушения на контуре (кровля, почва, бока);

в) структурное строение пород и массива (угол падения, трещиноватость, слоистость, неоднородность, анизотропия);

г) ориентация выработки (горизонтальная, вертикальная, вкрест, диагонально и вдоль напластования);

д) движение и давление флюидов (газ, подземные воды) в трещинах порах и пустотах массива и др.

Разработанная классификация форм проявлений горного давления в одиночной капитальной выработке без учета вторичных факторов приведена в табл. 3.2. В качестве основного (базового) критерия принят тип неравенств между локальными критериями разрушения пород ω_* (3.11) на различных участках контура.

Этот критерий (см. табл. 3.2) предопределяет механизм развития разрушения, тогда как модуль локального критерия разрушения $|\omega^*|$ показывает его интенсивность на данном участке контура. Вспомогательную роль выполняет обобщенный критерий, обобщенно оценивающий потерю устойчивости пород вокруг выработки (предложен Ю.З.Заславским):

$$k_3 = p/\sigma_{сж}^0, \quad (3.25)$$

где p - максимальная компонента исходного поля напряжений горного массива, в частном случае это может быть вес вышележащей толщи пород, МПа;

$\sigma_{сж}^0$ - прочность пород на одноосное сжатие (в образце), МПа.

Таблица 3.2 - Классификация устойчивости контура и форм проявлений горного давления в выработке

I Вполне устойчив	II Устойчив	III Не вполне устойчив
$k_3 < 0,15$ Почти всюду $ \omega^* < 1$ $\varepsilon_k < 1\%$	$k_3 = 0,1 \dots 0,25$ $ \omega^* > 1 > \omega^+$ или $\omega_*^{кр} > 1 > \omega_*^Б$ $\varepsilon_k = 1 \dots 5\%$	$k_3 = 0,2 \dots 0,4$ $ \omega^* > \omega_*^+ > 1$ или $\omega_*^к > \omega_*^Б > 1$ $\varepsilon_k = 5 \dots 10\%$
<i>Возможны отслоения и изолированные вывалы</i>	<i>Своды естественного равновесия в кровле (почве) ГВ</i>	<i>Своды и частичное разрушение боков</i>
IV Частично неустойчив	V Неустойчив	VI Крайне неустойчив
$k_3 = 0,3 \dots 0,6$ $\omega_*^+ > \omega_* > 1$ или $\omega_*^Б > \omega_*^к > 1$ $\varepsilon_k = 10 \dots 20\%$	$k_3 = 0,5 \dots 1,0$ Почти всюду $\omega_*^+ > 1$ $\varepsilon_k = 20 \dots 40\%$	$k_3 > 1$ $\omega_*^+ \gg 1$ $\varepsilon_k > 40\%$
<i>Разрушение в боках первично, затем разрушение в почве (кровле)</i>	<i>Зона неупругих деформаций, большие смещения контура</i>	<i>а) горные удары, выбросы пород б) вязко-пластическое течение</i>

Вторым вспомогательным критерием, оценивающим последствия проявления горного давления, принята относительная деформация контура ε_k , выраженная для удобства записи в процентах:

$$\varepsilon_k = (U_k/a_b) \cdot 100\%, \quad (3.26)$$

где U_k - смещения породного контура выработки, м;
 a_b - характерный линейный размер выработки, м.
 Для обычных выработок можно принять

$$a_{\%0} = \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (3.27)$$

где S - площадь поперечного сечения выработки вчерне, м².

К вполне устойчивым (**I класс**) относятся выработки, у которых почти на всем контуре $|\omega_*| < 1$ и лишь на отдельных изолированных участках его возможно отслоение пород и изолированные вывалы, вызванные местными ослаблениями прочности или концентрациями напряжений (например, на неровностях).

II класс охватывает процессы образования сводов естественного равновесия (СЕР) от растягивающих $|\omega_*| > 1 > \omega_*$ или сжимающих $\omega_*^k > 1 > \omega_*^B$ напряжений и стабилизации нового контура. (В качестве упражнения рассмотрите механизмы и последовательность разрушения пород при сводообразовании для различных случаев знаков напряжений в кровле, почве и боках выработки). Разумеется, второй случай образования СЕР от сжимающих напряжений возможен только при наличии прочностной анизотропии пород (слоистость, трещиноватость), что приводит к отслоению и потере устойчивости слоев.

В **III классе** устойчивости наблюдается одновременное разрушение пород от растяжения и сжатия, причем $|\omega_*^-| > \omega_*^+ > 1$, т.е. разрушение от растяжения является доминирующим, что приводит к образованию СЕР с частичным разрушением пород в боках.

IV класс (контур частично неустойчив), в отличие от третьего, основывается на ином неравенстве: $\omega_*^+ > |\omega_*^-| > 1$, т.е. разрушение от сжатия является первичным (например, в боках) и вызывает или усиливает разрушение от растяжения (в кровле или почве). Такая расчетная схема полностью выпала из поля зрения ученых и до

настоящих дней не изучается, несмотря на свою широкую распространенность, а потому и важность.

Если на большей части контура $\omega_*^+ > 1$, то вокруг выработки возникает зона неупругих деформаций (ЗНД), наблюдаются большие смещения пород и требуется мощная отпорная крепь. (**V класс** - неустойчивые породы).

К **VI классу** отнесены крайне неустойчивые формы проявлений горного давления, которые наблюдаются при $\omega_*^+ \gg 1$. При этом в хрупких газонасыщенных под большим давлением породах происходят горные удары и выбросы угля и пород, т.е. динамические процессы за малое время (порядка секунд). В пластичных слабых (особенно размокающих) породах наблюдается вязко-пластическое течение почти с постоянной скоростью. Чтобы сохранить выработку, требуются мощные крепи и большие затраты на их ремонт и восстановление.

Из предложенной классификации следует, что методы расчета проявлений горного давления в выработке должны базироваться на принципиально различных расчетных схемах. Поэтому попытки втиснуть все многообразие форм проявлений горного давления в один универсальный расчетный метод (например, как в нормативном документе СНиП-II-94-80) заведомо обречены на неудачу.

/Вам следует внимательно изучить по табл. 3.2 классификацию форм горного давления и соответствующие им основной и вспомогательные критерии/.

Для прогнозирования ожидаемой формы горного давления следует построить паспорт устойчивости выработки и вычислить базовый критерий ω_* , проверить по вспомогательному критерию k_3 . В существующих выработках полезен может быть вспомогательный деформационный критерий ε_k .

3.4. СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Эксплуатационной устойчивостью горной выработки называют такое состояние крепи и окружающего массива горных пород, которое обеспечивает эксплуатацию выработки с заданными надежностью и сроком службы.

Под управлением устойчивостью выработки понимают целенаправленные горноинженерные воздействия на массив горных

пород для снижения интенсивности проявлений в ней горного давления.

Интенсивность проявлений горного давления предопределяется классом устойчивости породного контура, характерными формами и скоростью разрушения и деформирования пород в выработке.

Способы и средства управления устойчивостью подразделяются по различным признакам:

по взаимодействию с массивом горных пород вокруг выработки (активные - пассивные);

по масштабу воздействия на массив (региональные - локальные);

по направленности воздействия на состояние массива (изменение прочности пород - изменение напряженно-деформированного состояния).

Активные способы предусматривают заблаговременное воздействие на состояние массива, как правило, до начала проявлений горного давления и направлены на изменение НДС и прочности пород, что позволяет не только уменьшить интенсивность их разрушения и деформирования, но и качественно изменить класс устойчивости (от ЗНД к сводообразованию и далее к вывалообразованию или полной устойчивости). Примеры: щелевая разгрузка, взрывная разгрузка и другие способы, направленные на изменение НДС массива вокруг выработки.

Пассивные способы являются традиционными и направлены на устранение негативных последствий проявлений горного давления (например крепление) без существенного, а тем более предварительного, изменения НДС массива.

Региональные способы способны изменить НДС массива вокруг комплексов выработок (наработка, подработка, охранные целики), а воздействие локальных ограничено одной выработкой или даже частью ее контура (крепь, щелевая разгрузка и др.).

Наиболее информативные признаки способа - это его способность изменять самые важные причинно-следственные связи, предопределяющие формы и интенсивность проявлений горного давления, а именно: показатели прочности пород или их НДС.

Рассмотрим способы обеспечения устойчивости горных выработок, направленные на изменение НДС и прочности пород в окружающем массиве (рис. 3.14):

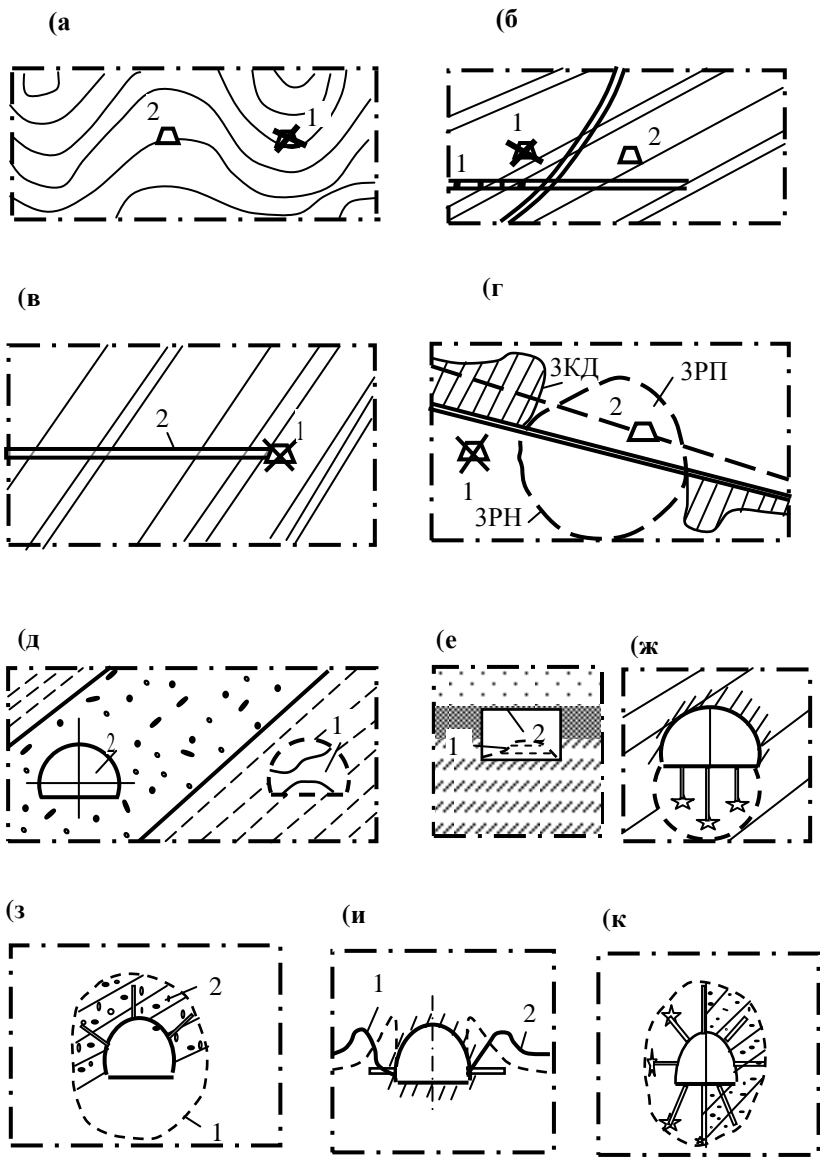


Рисунок 3.14 - Способы управления устойчивостью пород вокруг горных выработок

а) размещение выработок в тех областях массива горных пород, где напряжения заведомо понижены. Например, в антиклинальных складках вдоль их оси выработка устойчива (2), а в синклинальных - неустойчива (1);

б) в зоне дизъюнктивных дислокаций устойчивость выработки резко различается по разные стороны сместителя 3 (рис. 3.14,б) в зависимости от типа геологического нарушения (надвиг, сброс и др.) и направления движения надвинутого крыла сместителя (рекомендуется в качестве упражнения рассмотреть возможные случаи для различных геологических нарушений);

в) при наклонном и крутом залегании пластов выработки целесообразно ориентировать вкrest напластования (рис. 3.14,в), тем самым повышая их устойчивость (2) в несколько раз по сравнению с направлением выработок по простиранию (1). Это используют при ориентации главной оси околоствольных дворов.

(Задание: объясните, в чем причина этого явления, какие главные факторы влияют).

Устойчивость квершлагной выработки во многом зависит от направления проходки - навстречу или по падению. В первом случае устойчивость пород в проходческом забое существенно выше (почему?);

г) управлять устойчивостью выработок в зоне очистных работ можно, размещая их в зоне разгрузки-подработки (ЗРП) выше или надработки (ЗРН) ниже выработанного пространства лавы (рис. 3.14,г). Если выработка оказывается в зоне концентрации давления (ЗКД) у краевой части выработанного пространства под пластом, ее устойчивость резко снижается;

д) один из традиционных способов повышения устойчивости - размещение выработки в прочных породах (рис. 3.14,д), что особенно эффективно на малых и средних глубинах разработки. На больших глубинах прочные породы (песчаники) из-за перенапряжения и газонасыщения становятся выбросоопасными и этот способ следует применять с осторожностью;

е) в слоистых породах (рис. 3.14,е) повысить устойчивость выработки можно, используя "породы-мосты" в виде прочных пластов пород в кровле (почве), когда выработки проводят "под плоскую кровлю". Однако с глубиной эффективность способа снижается (почему?);

ж) принципиально новым способом, предложенным и разработанным в ДонГТУ, является управление формой выработки с

помощью разгрузки пород от напряжений взрыванием камуфлетных зарядов в почве (рис. 3.14,ж). При этом при малых коэффициентах бокового распора удается приблизиться к теоретическому соотношению $a/v \rightarrow \lambda$, что снижает напряжения в 1,5...2 раза и более;

з) при образовании вокруг выработки зоны неупругих деформаций (рис. 3.14,з) повышают устойчивость пород путем глубинного инъецирования упрочняющих растворов через инъекторы с помощью насосов. Прочность раздавленных горным давлением пород восстанавливают на 20..50%, что создает породонесущую конструкцию;

и) управлять напряженным состоянием пород можно путем целевой или скважинной разгрузки (рис. 3.14,и), которая отодвигает концентрацию напряжений от контура выработки в глубь массива. Выработка как-бы увеличивает свою ширину и вместо V наблюдается IV или даже III формы потери устойчивости, когда первичными оказываются разрушения от растягивающих напряжений;

к) наиболее эффективны комплексные способы управления устойчивостью, которые направлены на изменение напряженного состояния и прочности пород вокруг выработки. К их числу относится способ активной разгрузки и последующего глубинного упрочнения пород, предложенный ДонГТУ (рис. 3.14,к). В результате вокруг выработки или на части ее контура создают мощную породонесущую конструкцию;

л) самым распространенным способом управления устойчивостью являются традиционные конструкции крепи, которые оказывают пассивное сопротивление смещениям пород в выработку, но не способны изменить упругие напряжения вокруг выработки.

[При изучении этой темы студенту рекомендуется: дополнить список способов; подразделить их на региональные и локальные, активные и пассивные и обосновать, почему; указать область применения и ограничения; отметить важнейшие геомеханические и технологические параметры; выявить достоинства и недостатки].

Самым сложным и до конца нерешенным вопросом является определение параметров, области и эффективности применения способов охраны. Целесообразно для решения этих вопросов сопоставлять паспорта устойчивости и ожидаемую форму проявлений горного давления до и после применения способа охраны.

3.5. ШАХТНЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Для изучения горного давления в выработках с целью принятия решений по обеспечению ее устойчивости проводят шахтные инструментальные наблюдения. Оборудованный для измерения показателей взаимодействия крепи и массива участок выработки называют замерной станцией. Последняя оборудуется средствами измерения смещений пород и нагрузок на крепь.

Различают следующие шахтные наблюдения и исследования проявлений горного давления :

визуальные наблюдения, простейшие измерения и исследования смещений пород и крепи;

инструментальные измерения на замерных станциях смещений нагрузок на крепь;

специализированные измерения напряжений в крепи и породах, трещиноватости, давления флюидов, интроскопия массива.

3.5.1. Измерения смещений пород в выработку

Различают измерения абсолютных и относительных смещений пород. Абсолютные смещения определяют относительно неподвижного репера, закрепленного в глубине массива, или методом нивелирования (поднятие почвы, опускание пород кровли). Относительные смещения (конвергенция) позволяют судить об изменении расстояния между двумя заданными точками массива или выработки. Например, сближение (конвергенция) кровли и почвы, боков выработки и т.д.

Под деформациями понимают отношение измеренного смещения к общему расстоянию между заданными точками. Если высота выработки 3м, а конвергенция кровли с почвой составила 0.3м, то деформация равна 0.1, или 10%.

Для измерения смещений замерную станцию оборудуют контурными или глубинными реперами (по французски "*repere*" - закрепленная отметка, знак) (рис. 3.15). Для установки контурного репера (рис. 3.15,б) необходимо пробурить шпур 1 длиной 0,3...0,5м, плотно забить в него деревянную пробку 2, в которой затем неподвижно закрепить репер 3 с измерительным кольцом 4, которое служит для закрепления крючка рулетки с натяжной лентой. Ею производят измерения между реперами Б-Б, П-К (почва-кровля) через определенные временные интервалы (1-7 суток).

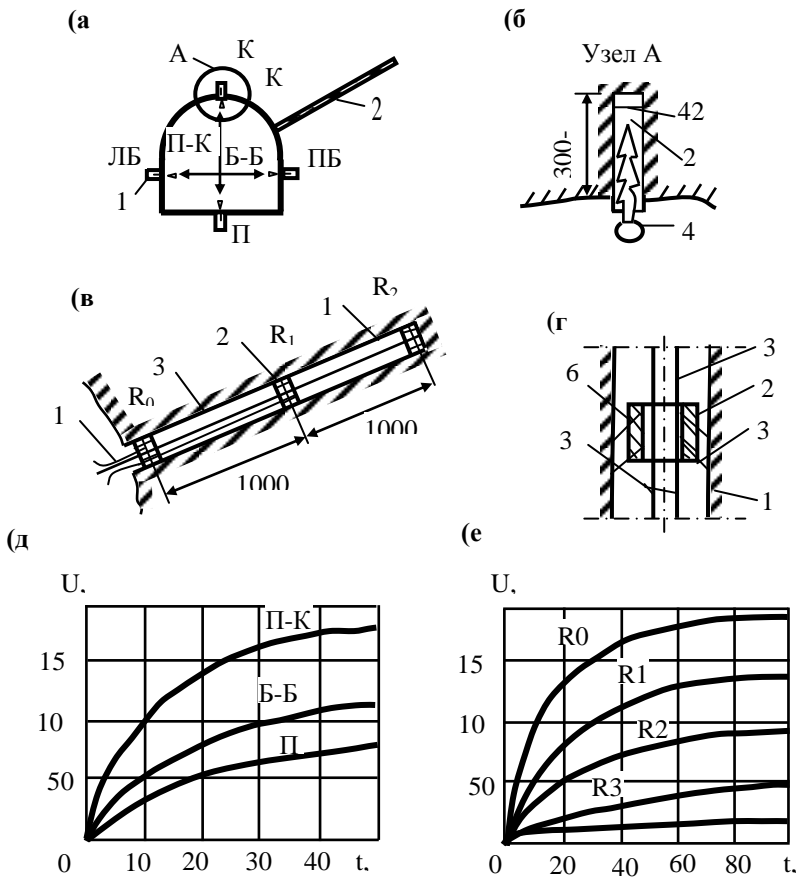


Рисунок 3.15 - Шахтные измерения смещений пород в выработку

- а) Замерная станция;
- б) устройство контурного репера;
- в) конструкция глубинных реперов;
- г) элементы глубинного репера;
- д) графики смещений контурных реперов;
- е) графики смещений глубинных реперов.

На рис. 3.15,а показан кроме контурного (1) и глубинный (2) репер. Конструкция последнего (рис. 3.15,в) состоит из закрепленных

через 1-2м в скважине 1 пробок 2, через которые пропущены измерительные тросики 3. На рис. 3.15,г представлен один из простейших вариантов закрепления пробки 2 из резиновой трубки в шпуре 1 с помощью проволочных усиков 5. Измерительные тросики 3 крепятся на опоре 6 и выходят в выработку в виде концов 4, по перемещениям которых судят о смещениях пород в глубине массива.

Графика смещений контурных (рис. 3.15,д) и глубинных (рис. 3.15,в) реперов позволяют судить о степени устойчивости пород, скорости стабилизации горного давления, неравномерности смещений по контуру. На графиках показаны относительные смещения боков (Б-Б), конвергенции кровли и почвы (П-К), реперов P0, P1 и др. относительно последнего репера в массиве, который условно считают неподвижным.

3.5.2. Измерения нагрузок на крепь выработки

При измерении нагрузок на крепь устанавливают замерные станции, оборудованные динамометрами (рис. 3.16). Динамометр представляет собой прибор, предназначенный для измерения силы, его конструкция должна быть предельно жесткой и не вносить изменений в характеристику крепи, на которую он установлен. Динамометры имеют разнообразную конструкцию (механические, тензометрические, индукционные, гидравлические, из вакуумной резины, битумные подушки и др.).

Динамометрическая рама (рис. 3.16,а) представляет собой рамную (реже - сплошную) крепь, на которую установлены динамометры 2, взаимодействующие через площадки 3 с породным контуром. Измерение нагрузок производят периодически через 3-10 суток.

Конструкция простейшего динамометра с упругим измерительным элементом из вакуумной резины 7 приведена на рис 3.16,б. /Разберитесь, как производят измерения нагрузок/.

Измерения нагрузок позволяют определить параметры взаимодействия крепи с массивом, распределение нагрузок по контуру крепи и их изменение во времени. Это важно для разработки методов расчета горного давления и крепи. Примеры графиков изменения нагрузок на крепь и скорости их стабилизации приведены на рис. 3.17. /Сделайте выводы о закономерностях нагружения крепи по этим графикам/.

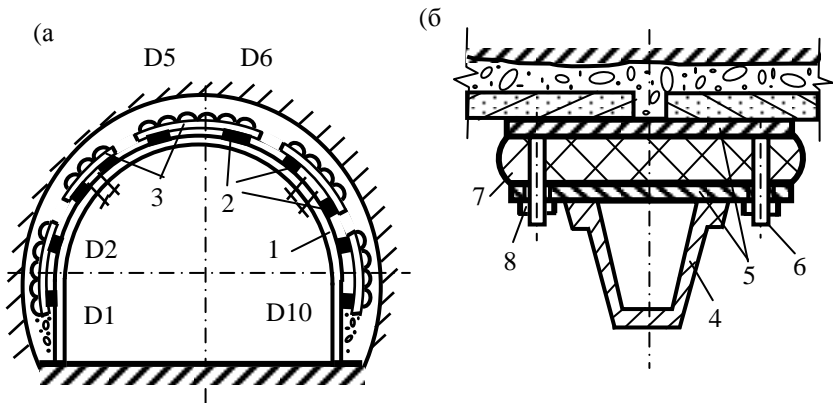


Рисунок 3.16 - Динамометрическая замерная станция на арочной крепи (а) и устройство динамометра (б): 1 - рама крепи; 2 - динамометры; 3 - площадка; 4 - спецпрофиль; 5 - плиты; 6 - мерные стержни; 7 - упругий элемент; 8 - отверстие

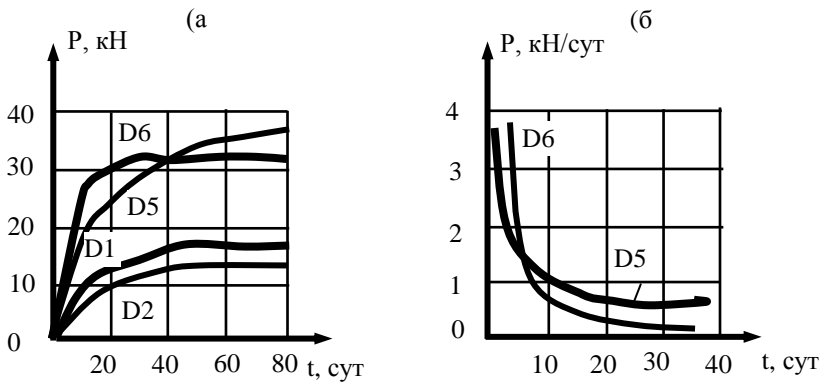


Рисунок 3.17 - Графики роста давления (а) и изменения его скорости (б) на динамометрической станции

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

I. Изучите материал и пополните знания путем конспектирования разделов учебников и дополнительной литературы:

1. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. - М.: Недра, 1984 (п. 3.1, 3.2 - с. 153-158; п. 3.3 - с. 143-148; п. 3.4 - с. 148-150).

2. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. - М.: Недра, 1982. - С. 51-60; 69-70.

3. Максимов А.П. Горное давление и крепь выработок. - М.: Недра, 1973 (п. 3.1 - с. 67-70; п. 3.4 - с. 118-124; п. 3.5 - с. 105-108).

4. Виттке В. Механика скальных пород. - М.: Недра, 1990 - С. 112-115, 127-128).

II. Проверьте и углубите свои знания, ответив на контрольные вопросы и выполнив **контрольные задания по разделу 3.1**:

1. Дайте определение паспорта устойчивости.

2. Какие исходные данные необходимы для определения паспорта устойчивости горных выработок?

3. В чем сущность метода расчета напряжений ДонГТУ?

4. Почему можно пренебречь взаимодействием крепи с упругим массивом?

5. Как найти компоненту напряжений σ_z , направленную вдоль оси выработки?

6. В чем физический смысл приведенной кривизны χ_i контура?

7. Как построить упрощенную эпюру прочности горных пород на контуре (или его развертке)?

8. Как определить прочность породы в массиве по известной прочности в образце?

9. Как экспериментально построить полярную диаграмму прочности слоистой породы?

10. Какие принципы заложены в расчет полярной диаграммы прочности?

11. В чем сущность алгоритма построения эпюры прочности по полярной диаграмме прочности пород?

12. Дайте определение локальному критерию разрушения ω^* объясните формулу для его вычисления.

13. Укажите связь значений и знака ω^* разрушением пород контура.

14. Как определить оптимальную форму выработки в однородных и слоистых породах?

15. Докажите формулу (3.13) дайте ее интерпретацию. В чем ее недостатки?

Контрольные задания и вопросы по разделу 3.2:

1. Нарисуйте схемы распределения главных напряжений вокруг горизонтальной и вертикальной выработки.

2. Объясните возможные механизмы разрушения на контуре выработки с помощью диаграммы О.Мора и паспорта прочности.

3. Как происходит разрушение сдвигом по логарифмическим спиральям?

4. Как определить нагрузку на крепь при вывалообразовании (сущность, чертеж, доказательство формулы)?

5. Объясните сущность образования сводов естественного равновесия (СЕР) на различных участках контуров выработки. Каковы возможные формы СЕР?

6. Как оценить нагрузку на крепь от разной формы СЕР (чертеж, доказательство формулы)?

7. Как разрушается порода на стенках ствола (сущность, схемы, формулы)?

8. Разрушение пород на контуре по винтовым поверхностям, форма, размеры и вес пирамидальных вывалов.

9. Приведите примеры различных форм разрушения пород на контуре горизонтальной (вертикальной) выработки, задавшись возможным распределением напряжений.

10. Сопоставьте различные формы разрушения пород по степени их влияния на потерю устойчивости выработки.

Контрольные задания и вопросы по разделу 3.3:

1. Как изменяется форма контура при разрушении пород от растягивающих и сжимающих напряжений?

2. Дайте анализ изменения напряжений вокруг круглой выработки при разрушении пород от растяжения.

3. Как изменяются напряжения вокруг выработки при разрушении пород от сжатия?

4. Когда происходит самопроизвольная остановка разрушения вокруг выработки? Почему?

5. В каких условиях разрушение вокруг выработки самоускоряется? Приведите примеры, доказательства.

6. В чем физическая сущность локального нормированного критерия разрушения?

7. Сформулируйте первую фундаментальную закономерность разрушения и дайте ее символьное доказательство.

8. Дайте формулировку второй фундаментальной закономерности разрушения пород в выработке и приведите ее символьное доказательство.

9. На чем базируется новая классификация устойчивости выработок, в чем ее главные отличия от существующих?

10. Перечислите вторичные признаки новой классификации устойчивости выработок.

11. Разъясните сущность базового (основного) и двух вспомогательных критериев устойчивости выработок. В чем их различие?

12. Какие условия характеризуют I и II классы устойчивости горных выработок?

13. В чем сущность и каковы критерии III класса устойчивости горных выработок?

14. В чем сущность и каковы критерии IV класса устойчивости выработки?

15. В чем сущность и каковы критерии V и VI классов устойчивости выработки?

16. Как зависят различные классы устойчивости выработок от коэффициента бокового распора массива? Приведите примеры.

17. Дайте анализ влияния угла падения на образование сводов естественного равновесия в слоистых породах.

18. Объясните изменение классов устойчивости штрека и квершлага в наклоннослоистом горном массиве.

Контрольные задания и вопросы по разделу 3.4:

1. Что называют эксплуатационной устойчивостью выработки, по каким признакам подразделяются способы и средства управления устойчивостью?

2. Объясните сущность и приведите примеры пассивных и активных способов управления устойчивостью выработок.

3. Как изменяется устойчивость выработки в складчатом массиве? В зонах дизъюнктивных дислокаций?

4. Как влияет надработка и подработка на устойчивость выработок?

5. Как повысить устойчивость выработки в слоистом массиве?
6. Объясните сущность способа активной разгрузки, предложенный ДонГТУ.
7. За счет чего повышается устойчивость выработки при использовании щелевой (скважинной) разгрузки?
8. Сформулируйте основное техническое противоречие при обеспечении устойчивости выработок и его решение способом АРПУ (ДонГТУ).
9. В чем сущность комплексных способов обеспечения устойчивости выработки? Каковы их основные параметры?
10. Приведите как можно более полный перечень активных и пассивных способов управления устойчивостью выработки? Какие критерии позволяют оценить их эффективность?

Контрольные задания и вопросы по разделу 3.5:

1. Какие проводят шахтные наблюдения и какое оборудование устанавливают на замерных станциях?
2. Как измеряют смещения и скорости смещений пород в выработку?
3. Как устроена замерная станция с контурными и глубинными реперами?
4. Какую информацию можно почерпнуть из графиков смещений контурных и глубинных реперов? Из их скоростей смещений?
5. Опишите устройство динамометрической замерной станции.
6. Какие конструкции динамометров вам известны? Каким требованиям они должны отвечать?
7. Для чего и как производят тарировку динамометров?
8. Какую информацию можно извлечь из показаний динамометров? Как она обрабатывается?
9. Каковы перспективные направления совершенствования шахтных инструментальных замеров?

III. Выполните лабораторные работы

1. Изучите закономерности образования сводов естественного равновесия на лабораторном стенде сыпучих материалов.
2. Промоделируйте разрушение пород на стенде эквивалентных материалов.

3. Используя патентный фонд ДонГТУ, проанализируйте тенденции в развитии измерений проявлений горного давления.

4. Предложите конструкции динамометров для анкерной и набрызгбетонной крепи.

5. Ознакомьтесь с фотограмметрией для измерения смещений контура горных выработок.