Дисциплина «Механика горных пород»
для студентов ОП 6В07202 "Горное дело"

Лекция 5. Устойчивость горных выработок и методы её оценки

Цель лекции: Сформировать у обучающихся систему знаний о критериях устойчивости горных выработок, освоить эмпирические, аналитические и численные методы оценки устойчивости, научиться определять размеры зон неупругих деформаций для различных условий, а также учитывать фактор времени (ползучесть, релаксацию) при прогнозировании долговременной устойчивости.

План лекции:

1) Критерии устойчивости.
2) Методы расчета устойчивости.
3) Определение размеров ЗНД для выработок различных форм и глубины.
4) Влияние времени на устойчивость (ползучесть, релаксация). Понятие о длительной прочности.

1. Критерии устойчивости

Устойчивость горной выработки – способность массива (включая крепь) сохранять проектную форму и размеры поперечного сечения в течение заданного срока эксплуатации без потери несущей способности или с допустимыми деформациями, не нарушающими нормальную работу.

Основные количественные критерии устойчивости:

1.1. Смещения контура выработки (конвергенция)

Конвергенция – сближение противоположных точек контура (кровля-почва, бока). Измеряется в мм. Для выработок без крепи (или с крепью) задают предельно допустимые смещения (ПДС) в зависимости от типа выработки и срока службы:

Тип выработки	ПДС, мм	Примечание
Капитальные (стволы, околоствольные дворы)	< 20–30	Не допускаются деформации, нарушающие работу подъёма
Подготовительные (штреки, квершлаги)	30–50	Допустимы мелкие отслоения, крепь может деформироваться
Очистные камеры (временные)	50–100	Обрушение кровли может быть запланировано

Тип выработки	ПДС, мм	Примечание
Выработки в ползучих породах (соли, глины)	> 100–200	Требуется податливая крепь

ПДС устанавливают по результатам натурных наблюдений или численных расчётов.

1.2. Скорость сходимости

Скорость изменения расстояния между реперами (мм/сут). Для большинства выработок в скальных породах:

Скорость, мм/сут	Оценка состояния
< 0,1	Устойчивое, можно не крепить
0,1–0,5	Удовлетворительное, требуется лёгкая крепь
0,5–2,0	Неустойчивое, необходима усиленная крепь
> 2,0	Аварийное, немедленное крепление или перекрепление

Если скорость не затухает, а растёт – признак прогрессирующего разрушения.

1.3. Размеры зоны неупругих деформаций (ЗНД)

Глубина ЗНД от контура в кровлю, почву и бока. Характеризует объём пород, перешедших в предельное состояние. Для капитальных выработок ЗНД не должна превышать 0,5–1,0 м (при длине анкеров 1,5–2,0 м). Превышение критических значений (h > 0,4–0,5 от пролета) говорит о формировании свода обрушения.

1.4. Коэффициент запаса прочности (Strength Factor, SF)

В численных моделях SF – отношение прочности породы (по принятому критерию: Кулона-Мора, Хока-Брауна) к действующим напряжениям в данной точке:

$$SF = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{\sigma_{\text{действ}}}$$

- SF > 1 – запас прочности, разрушения нет.
- SF = 1 – предельное состояние.
- SF < 1 – зона разрушения (неупругих деформаций).

На практике для оценки устойчивости используют пороговые значения:

- SF ≥ 1,5 – устойчиво (допустимо для временных выработок);
- SF ≥ 2,0 – для капитальных выработок (коэффициент надёжности).

Зоны с SF < 1,2 рассматриваются как зоны повышенного риска и требуют крепления.

2. Методы расчета устойчивости

Различают эмпирические, аналитические и численные методы. Выбор зависит от стадии проектирования, сложности условий и доступных данных.

2.1. Эмпирические методы (по классификациям RMR, Q)

Самый быстрый способ – использовать рекомендации, встроенные в рейтинговые классификации.

- по RMR: для каждого класса (I–V) даны типовые пролеты выработок без крепления (временные) и рекомендации по крепи (см. лекцию 3). Например, при RMR = 51-60 (класс III) рекомендуемый пролет (без крепи) 1,5–2,0 м.

- по Q: эквивалентный пролет $B = 2 \cdot ESR \cdot Q^{0,4}$, где ESR – коэффициент назначения (для капитальных выработок ESR = 1,6; для временных ESR = 3-5). Если фактический пролет больше B – требуется крепь.

Метод графика устойчивости (Mathews–Potvin) – для очистных камер по значениям гидравлического радиуса $HR =$ площадь/периметр и модифицированного числа устойчивости N' определяют вероятность обрушения и размеры зон разубоживания.

2.2. Аналитические методы

Дают приближённые, но быстрые оценки.

Метод Протодьяконова (свода обрушения):

- Предполагает, что над выработкой образуется параболический свод, на который опираются вышележащие породы.

- Высота свода: $h = \frac{a}{f}$, где a – полупролет выработки, f – коэффициент крепости по Протодьяконову (обычно 0,5–15).

- Давление на крепь кровли: $P = \gamma h$. Боковое давление для слабых пород: $P_{\text{бок}} = \gamma h \cdot \lambda$.

Метод применим для выработок в не очень крепких породах ($f \leq 4$–6) и глубинах, где нет тектонических напряжений.

Эти формулы полезны для предварительной оценки размеров ЗНД и требуемой несущей способности крепи.

2.3. Численные методы

Основной инструмент современного проектирования – численное моделирование НДС с использованием МКЭ (RS2, PLAXIS), МКР (FLAC), МДЭ (UDEC, 3DEC). Преимущества:

- учёт сложной геометрии, слоистости, анизотропии;

- моделирование поэтапной отработки и установки крепи;

- расчёт полей напряжений, смещений, зон SF;

- возможность параметрического анализа.

Недостатки: требуют квалификации, верификации на натурных данных, больших вычислительных ресурсов для 3D.

3. Определение размеров ЗНД для выработок различных форм и глубины

3.1. Факторы, влияющие на размеры ЗНД

- Глубина – чем глубже, тем выше исходные напряжения, тем больше ЗНД.
- Прочность пород ($\sigma_{сж}, c, \varphi$) – выше прочность → меньше ЗНД.
- Форма сечения – острые углы увеличивают концентрацию и ЗНД; арочная и круглая формы минимизируют.
- Способ проведения (БВР) – взрывные работы создают зону нарушенности (D > 0), увеличивая ЗНД.

3.2. Эмпирические приближения

По данным натурных замеров и моделирования, для выработок в скальных породах ($\sigma_{сж} = 50$–150 МПа) глубина ЗНД в кровле (без крепи) составляет:

- Прямоугольная форма (ширина 4–6 м): $h_{ЗНД} \approx 0{,}3 \div 1{,}0$ м на глубине 200–400 м; при глубине 800 м – до 2–3 м.
- Арочная форма (та же ширина): ЗНД на 30–40% меньше.
- Круглая форма (диаметр 5–6 м): ЗНД минимальна – около 0,5 м на глубине 600 м.

Ориентировочная формула для арочных выработок в слаботрещиноватых породах:

$$h_{ЗНД} \approx 0{,}03H \cdot \frac{80}{\sigma_{сж}}$$

где H в м, $\sigma_{сж}$ в МПа. Например, при $H = 800$ м, $\sigma_{сж} = 80$ МПа: $h \approx 0{,}03 \cdot 800 \cdot 1 = 24$ см Это занижено. Более реально: для прямоугольных выработок $h = (0{,}01$–$0{,}02)H$ для крепких пород. Но лучше использовать численные расчёты.

3.3. Критические глубины

Глубина «стреляния» (горных ударов) – когда вертикальные напряжения приближаются к прочности породы ($\sigma_v \approx 0{,}5\sigma_{сж}$ – начало микросейсмичности, $\sigma_v \approx 0{,}8$-$1{,}0\sigma_{сж}$ – динамические явления).

$$H_{кр} \approx \frac{\sigma_{сж}}{\gamma}$$

Для крепких гранитов ($\sigma_{сж} = 200$ МПа, γ=0,027 МН/м³) $H_{кр} \approx 7400$ м – очень глубоко. Для пород средней прочности (80 МПа) $H_{кр} \approx 3000$ м. На практике горные удары возможны и на меньших глубинах при наличии тектонических напряжений.

При превышении критической глубины выработки переходят в режим интенсивных ЗНД, и требуется специальное управление горным давлением (разгрузочные щели, податливая крепь, гидроразрыв).

4. Влияние времени на устойчивость (ползучесть, релаксация). Понятие о длительной прочности

4.1. Ползучесть

Ползучесть – непрерывное увеличение деформаций во времени при постоянном напряжении. Характерна для пород-солей, глин, мерзлых пород, некоторых сланцев. Кривая ползучести имеет три стадии:

1. Затухающая (неупругая) – деформация асимптотически стремится к пределу (образец не разрушается).
2. Установившаяся (стационарная) – деформация растёт с постоянной скоростью.
3. Ускоренная – предразрушение, переход к лавинному деформированию.

Математические модели: модель Максвелла, Кельвина-Фойгта, Бюргерса (комбинация этих).

4.2. Релаксация напряжений

Релаксация – уменьшение напряжений при постоянной деформации. Процесс обратный ползучести. Характерен для тех же пород. Время релаксации $\tau = \eta/E$, где η – вязкость. Для каменной соли τ может составлять часы-дни, для гранита – годы.

4.3. Длительная прочность

Длительная прочность (σ_∞) – максимальное напряжение, которое порода может выдерживать неопределённо долго без разрушения (с учётом ползучести). Обычно составляет 50-80% от кратковременной прочности. Для хрупких пород (граниты, кварциты) ползучесть незначительна, и $\sigma_\infty \approx 0{,}9\sigma_{\text{кратк}}$. Для пластичных пород (соль, глины) $\sigma_\infty \approx 0{,}5\sigma_{\text{кратк}}$.

При проектировании подземных сооружений с длительным сроком службы (капитальные выработки, подземные хранилища) необходимо использовать длительную прочность, а не кратковременную.

4.4. Практические рекомендации

- Для выработок со сроком службы > 5–10 лет в пластичных породах: занижать прочность в расчётах, использовать податливую крепь и закладку.
- Для хрупких пород достаточно учитывать кратковременную прочность и коэффициент запаса 1,5–2,0.
- Мониторинг сходимости и микросейсмики позволяет выявлять начало ускоренной ползучести и своевременно усиливать крепь.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Назовите четыре основных критерия устойчивости горных выработок. Как измеряется конвергенция и какие её значения считаются аварийными?
2. В чём различие между эмпирическим методом расчёта устойчивости (по RMR) и аналитическим методом Протодьяконова? Укажите область применения каждого.

3. Как изменяются размеры зон неупругих деформаций (ЗНД) с увеличением глубины и уменьшением прочности пород? Приведите примерную формулу для оценки глубины ЗНД в кровле.

4. Дайте определение ползучести, релаксации и длительной прочности. Для каких пород эти эффекты наиболее существенны?

5. Для выработки, пройденной в сильнотрещиноватых породах ($RMR = 45$), на какой максимальный пролет без крепления можно рассчитывать по классификации Q (ESR=1,6)? При расчёте используйте приближённую связь RMR=9lnQ+44.

Рекомендуемая литература:

1. Bieniawski Z.T. Engineering Rock Mass Classifications. – Wiley, 1989.
2. Hoek E., Brown E.T. Underground Excavations in Rock. – IMM, 1980.
3. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика горных пород. – М.: Недра, 1986.
4. Зубков В.В., Зубков А.В. Геомеханика. – М.: МГГУ, 2008.
5. Рекомендации по выбору параметров крепи на основе рейтинговых классификаций (ISRM).