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

Лекция 9. Геомеханика открытых горных работ и отвалов

Цель лекции: Изучить основные типы деформаций бортов карьеров и откосов, факторы, влияющие на их устойчивость; освоить методы расчета устойчивости откосов (алгебраическое суммирование, метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения, метод конечных элементов); ознакомиться с системами геотехнического мониторинга; рассмотреть особенности формирования отвалов и методы оценки их устойчивости.

План лекции:

1) Устойчивость бортов карьеров и откосов: типы деформаций (оползни, обвалы, осыпи).

2) Факторы устойчивости: геологическое строение, трещиноватость, гидрогеология, сейсмичность.

3) Методы расчета устойчивости откосов: метод алгебраического суммирования (Терцаги), метод круглоцилиндрических поверхностей, метод конечных элементов.

4) Геотехнический мониторинг бортов: автоматизированные системы, GPS, инклинометры, экстензометры.

5)Устойчивость отвалов: особенности формирования, расчет коэффициента запаса.

1. Устойчивость бортов карьеров и откосов: типы деформаций

Борта карьеров представляют собой искусственные откосы большой высоты (до 500-800 м и более). Их устойчивость – ключевое условие безопасной и экономичной разработки. Потеря устойчивости приводит к оползням, обвалам, осыпям, что вызывает простой техники, травматизм и значительные материальные потери.

1.1. Основные типы деформаций

- Осыпи (сыпи) – падение отдельных кусков породы с поверхности откоса под действием силы тяжести. Происходят в выветрелых, трещиноватых породах без образования выраженной поверхности скольжения. Могут быть постоянными (медленное перемещение) или внезапными (после дождей, морозов).
- Обвалы – быстрое отторжение крупных блоков породы по трещинам отрыва. Характерны для скальных массивов с крутыми трещинами. Обвалы часто катастрофичны, так как происходят практически мгновенно.
- Оползни – смещение пород по сформированной поверхности скольжения (плоской, цилиндрической, комбинированной). Делятся на:

- *Деструктивные (сдвиг)* – блоки смещаются без существенного нарушения их внутренней структуры.

- *Вязкопластичные (течение)* – порода (глины, мелкозернистые грунты) течёт, как вязкая жидкость.

- *Сложные* – комбинация сдвига и течения.

По глубине захвата оползни бывают поверхностные (до 5-10 м), мелкие (10-30 м), глубокие (30-100 м) и очень глубокие (>100 м). В карьерах наиболее опасны глубокие оползни, захватывающие несколько уступов.

2. Факторы устойчивости

Устойчивость откоса определяется комплексом природных и техногенных факторов.

2.1. Геологическое строение

- Структура массива: монолитность, слоистость, наличие разломов, трещиноватость. Падение слоёв в сторону карьера («залегание в борт») резко снижает устойчивость.
- Литологический состав: чередование прочных и слабых пород. Слабые прослои (глины, угли, мергели) служат потенциальными поверхностями скольжения.

2.2. Трещиноватость

- Системы трещин, их густота, раскрытие, шероховатость, заполнитель. Трещины с глинистым заполнителем (милонит) создают готовые плоскости скольжения.
- Ориентация трещин относительно откоса: трещины, падающие в сторону выработки, наиболее опасны.

2.3. Гидрогеология

- Подземные воды – главный дестабилизирующий фактор. Снижают эффективные напряжения (взвешивающее действие), уменьшают сцепление и угол трения, создают гидродинамическое давление в сторону откоса.
- Фильтрация воды из отстойников, водоохлаждающих устройств, атмосферных осадков – дополнительные источники обводнения.

2.4. Сейсмичность

Динамические нагрузки (землетрясения, массовые взрывы) могут спровоцировать обрушение даже устойчивого откоса. При расчётах в сейсмических районах вводят горизонтальную сейсмическую силу, действующую на призму обрушения.

2.5. Техногенные факторы

- Угол откоса – чем круче, тем выше риск.
- Высота откоса (борта) – с ростом высоты увеличиваются сдвигающие силы.
- Нагрузка на бровке (отвалы, техника).
- Взрывные работы – сотрясение, рост трещиноватости.

3. Методы расчета устойчивости откосов

Выбор метода зависит от типа пород, сложности инженерно-геологических условий и требуемой точности.

3.1. Метод алгебраического суммирования (К. Терцаги)

Применяется для плоских (ламинарных) поверхностей скольжения (сдвиг по слабому прослою, контакту пород). Рассматривается призма обрушения, разделённая на вертикальные блоки. Для каждого блока вычисляют сдвигающую T_i и удерживающую R_i силы. Коэффициент запаса устойчивости:

$$F_s = \frac{\sum R_i}{\sum T_i} = \frac{\sum (N_i \cdot \tan \varphi_i + c_i \cdot l_i)}{\sum T_i}$$

где N_i – нормальная составляющая веса блока,

T_i – сдвигающая составляющая,

l_i – длина основания блока,

c_i, φ_i – прочностные параметры на площадке скольжения.

3.2. Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения (метод Феллениуса, Янбу, Бишопа)

Используется для однородных и слоистых массивов, где поверхность скольжения аппроксимируется дугой окружности. Наиболее распространён метод Бишопа, учитывающий межблочные силы. Итерационный расчёт даёт минимальный F_s для разных центров вращения.

Для упрощённых оценок применяют метод Феллениуса (не учитывает межблочные силы):

$$F_s = \frac{\sum (N_i \cdot \tan \varphi_i + c_i \cdot l_i)}{\sum T_i}$$

Коэффициент запаса для карьерных откосов обычно принимают:

- $F_s \geq 1{,}3$ – для постоянных бортов;
- $F_s \geq 1{,}2$ – для временных;
- $F_s \geq 1{,}1$ – для откосов, где допустимы локальные осыпи.

3.3. Метод конечных элементов (МКЭ)

Современный инструмент для сложных задач: учёт анизотропии, неоднородности, трещиноватости, поэтапного строительства карьера (отработка уступов). В пакетах PLAXIS, RS2, FLAC моделируется напряжённо-деформированное состояние и вычисляется коэффициент запаса методом снижения прочности (c, φ уменьшают до достижения предельного равновесия).

4. Геотехнический мониторинг бортов

Мониторинг – обязательное условие эксплуатации глубоких карьеров. Обеспечивает раннее обнаружение деформаций и принятие мер.

4.1. Автоматизированные системы

• Радарные интерферометры (GroundProbe, SSR) – сканируют поверхность борта с частотой раз в несколько минут, фиксируют смещения с точностью до 1 мм. Создают карты скоростей смещения.

• Лазерное сканирование (LiDAR) – периодическое создание 3D-моделей бортов, сравнение моделей выявляет зоны деформаций.

4.2. Геодезические методы

• GPS-станции (глобальные системы позиционирования) – устанавливаются на реперах на уступах. Дешёвый и достаточно точный метод (до 5–10 мм) при наличии спутникового сигнала.

• Тахеометрия – периодическая съёмка реперов с контролем координат.

4.3. Глубинные измерения

• Инклинометры – измеряют горизонтальные смещения по глубине скважины. Позволяют определить глубину и скорость смещения поверхности скольжения.

• Экстензометры – струнные или стержневые датчики, закреплённые в массиве на разных глубинах. Регистрируют деформации растяжения-сжатия.

4.4. Системы раннего предупреждения

При превышении пороговых скоростей смещения (обычно 3–5 мм/сут) система автоматически подаёт звуковой сигнал и оповещает персонал. В крупных карьерах («Мурунтау», «Кумтор», Bingham Canyon) созданы интегрированные системы мониторинга с десятками датчиков.

5. Устойчивость отвалов

Отвал – искусственная насыпь из вскрышных пород (пустых или некондиционных руд). Высота отвалов достигает 100–300 м, площадь – многие км².

5.1. Особенности формирования отвалов

• Зерновой состав: от крупных глыб до пылеватых частиц.

• Уплотнение: пористость от 20% (скальные отвалы) до 50% (рыхлые).

• Укладка: бульдозерные отвалы (породы сбрасываются с верхней бровки), экскаваторные (послойная укладка), гидроотвалы (подача пульпы).

• Водонасыщение: главная опасность – фильтрация воды через тело отвала, снижение прочности, разжижение мелких фракций.

5.2. Типы деформаций отвалов

• Оползни по подошве (по контакту с коренными породами);

• Сдвиги внутри отвала по ослабленным прослоям (например, по пылеватым горизонтам);

• Просадки (вторичная консолидация) – медленные вертикальные смещения;

• Грязевые потоки (при насыщении водой мелкоземистого отвала).

5.3. Расчёт коэффициента запаса устойчивости отвала

Аналогичен расчёту откосов, но с учётом:

- Неоднородности (слоистость отвала);
- Порового давления (при наличии воды);
- Нагрузки от отвального оборудования.

Для предварительной оценки используют метод круглоцилиндрических поверхностей, укрепляя слабые основания дренажными устройствами или уполаживанием откоса.

5.4. Меры повышения устойчивости отвалов

- Выполаживание откосов (угол 30–35° для рыхлых пород, 40–45° для скальных);
- Уплотнение при укладке (катками, бульдозерами);
- Дренажные системы (перехват воды, отвод фильтрата);
- Контрольный мониторинг (марки, GPS).

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Назовите основные типы деформаций бортов карьеров. Чем отличается оползень от обвала?
2. Перечислите природные и техногенные факторы, влияющие на устойчивость откосов. Почему гидрогеология играет ключевую роль?
3. В чём суть метода алгебраического суммирования (Терцаги)? Для каких поверхностей скольжения он применяется?
4. Какие современные автоматизированные системы используются для мониторинга бортов карьеров? Как они работают?
5. Чем отличаются методы расчёта устойчивости отвалов от расчёта карьерных откосов? Какие специфические риски связаны с отвалами?

Рекомендуемая литература:

1. Hoek E., Bray J.W. Rock Slope Engineering. – 3rd ed. – London, 1981.
2. Ухов С.Б., Семёнов В.В. Механика грунтов, основания и фундаменты. – М.: Высшая школа, 2007.
3. Зубков В.В., Зубков А.В. Геомеханика. – М.: МГГУ, 2008.
4. ВНИМИ. Инструкция по ведению мониторинга устойчивости бортов карьеров. – СПб., 2009.
5. Duncan J.M., Wright S.G. Soil Strength and Slope Stability. – Wiley, 2005.