Дисциплина «Механика горных пород»
для студентов ОП 6B07202 "Горное дело"

Лекция 10. Геомеханический мониторинг и обратный анализ

Цель лекции: Сформировать у обучающихся понимание целей и задач геомеханического мониторинга; изучить основные инструментальные методы (тензометры, деформографы, экстензометры, микросейсмические системы); ознакомиться с автоматизированными системами мониторинга и системами раннего предупреждения; освоить методологию обратного анализа (back-analysis) для калибровки геомеханических моделей по натурным данным; рассмотреть примеры успешного применения мониторинга и обратного анализа на рудниках.

План лекции:

1) Цели и задачи мониторинга: контроль сдвижений, напряжений, сейсмичности, эффективности крепи.

2) Инструментальные методы: тензометры, деформографы, реперы, экстензометры, микросейсмические системы.

3) Автоматизированные системы мониторинга: передача данных в реальном времени, системы раннего предупреждения.

4) Обратный анализ (back-analysis): калибровка параметров модели по натурным данным, уточнение прочностных характеристик.

5) Примеры: мониторинг сдвижений на рудниках, прогноз горных ударов, корректировка параметров крепи.

1. Цели и задачи геомеханического мониторинга

Геомеханический мониторинг – система регулярных или непрерывных наблюдений за состоянием горного массива, его деформациями, напряжённым состоянием, сейсмичностью и работой крепи. Это неотъемлемая часть современного горного производства, особенно на глубоких горизонтах и в сложных геологических условиях.

1.1. Основные цели мониторинга

- Обеспечение безопасности – своевременное выявление опасных деформаций и предотвращение аварий (обрушений, горных ударов).
- Контроль эффективности крепи – проверка соответствия фактических нагрузок проектным, оценка необходимости усиления.
- Верификация расчётных моделей – сопоставление прогнозов с реальностью, повышение достоверности проектных решений.
- Прогнозирование геодинамических явлений – обнаружение предвестников горных ударов, выбросов породы и газа.

• Оптимизация параметров горных работ – корректировка систем разработки, размеров камер и целиков на основе обратной связи от мониторинга.

1.2. Задачи мониторинга

• Контроль сдвижений (смещений) – измерения конвергенции кровли, почвы и боков выработок; наблюдения за сдвижением поверхности над очистными выработками.

• Контроль напряжений – измерения напряжений в массиве (методы разгрузки, гидроразрыв, акустическая эмиссия) и напряжений в элементах крепи (тензометрия).

• Сейсмологический контроль – регистрация микросейсмических событий (импульсов, возникающих при трещинообразовании). Локация очагов сейсмичности позволяет выделить зоны активного разрушения.

• Контроль эффективности крепи – измерение усилий в анкерах, напряжений в рамах, деформаций набрызг-бетона.

2. Инструментальные методы

Тензометры (тензорезисторы) – датчики, основанные на изменении электрического сопротивления при деформации. Наклеиваются на элементы крепи (анкеры, арки) или на специальные штанги, заделанные в массив. Позволяют измерять с высокой точностью (до 10^{-5} относительной деформации) напряжения и усилия в реальном времени. Различают проволочные, фольговые, полупроводниковые тензометры.

Деформографы – приборы для измерения смещений между двумя точками на поверхности выработки или в массиве. Конструктивно – длиннобазные (до 10-20 м) механические или электрические датчики с проволочной тягой или индуктивным преобразователем. Применяются для контроля сходимости выработок, особенно в зонах тектонических нарушений.

Реперы – простейшие металлические штыри или пластины, закреплённые в массиве. Периодический замер координат реперов геодезическими методами (тахеометрия, нивелирование) даёт информацию о вертикальных и горизонтальных смещениях. Используются как на поверхности (мульда сдвижения), так и в подземных выработках.

Экстензометры – более совершенные реперные системы с возможностью непрерывной регистрации. Бывают:

• Струнные – изменение частоты колебаний натянутой струны пропорционально деформации.

• Стержневые – телескопические стержни с датчиками линейных перемещений (LVDT).

• Магнитные – скользящие кольца на глубинных реперах.

Экстензометры устанавливаются в скважины и позволяют измерять распределение деформаций по глубине массива (до 50–100 м от контура выработки).

Микросейсмический мониторинг – регистрация сейсмических волн, генерируемых при образовании микротрещин и росте макротрещин. Система состоит из сети трёхкомпонентных геофонов (числом до 30-100) и центра обработки данных. Позволяет:

- локализовать очаги разрушения с точностью 10-50 м;
- определять энергию и магнитуду событий;
- строить карты сейсмической активности и выделять зоны повышенного риска.

Типичные системы – ESG (Канада), ИГД СО РАН (Россия), собственные разработки для рудников (например, «Апатит», «Норильский никель»).

3. Автоматизированные системы мониторинга

Современный мониторинг перешёл от эпизодических замеров к непрерывным автоматизированным системам с передачей данных в реальном времени.

3.1. Структура автоматизированной системы

- Датчики (тензометры, экстензометры, сейсмоприёмники, роботизированные тахеометры) – размещаются в шахте или на карьере.
- Контроллеры и модули сбора данных (PLC, измерительные станции) – преобразуют аналоговые сигналы в цифровой код.
- Каналы связи (витая пара, оптоволокно, радио, подземная сотовая сеть, Wi-Fi) – передают данные на поверхность.
- Сервер баз данных и программное обеспечение – хранение, обработка, визуализация.
- Интерфейс оператора – мнемосхемы, тренды, системы оповещения.

3.2. Системы раннего предупреждения (EWS)

Early Warning System – автоматическая система, которая при превышении пороговых значений (скорость смещения, частота сейсмических событий) выдаёт звуковые и световые сигналы, останавливает оборудование и эвакуирует персонал.

Примеры порогов:

- Конвергенция кровли > 5 мм/сут – тревога (замедление работ).
- Сейсмическая активность – резкий рост количества событий малой магнитуды (предвестники горного удара) → остановка работ, эвакуация.
- Деформация анкерной крепи > допустимой – подача сигнала на усиление крепи.

Известные реализованные системы:

- Система мониторинга рудника «Северная» (Норильск) – контроль напряжений, смещений, сейсмичности, газовыделения.
- Кирунский рудник (LKAB, Швеция) – автоматизированная сеть геофонов и экстензометров для прогноза горных ударов.
- Bingham Canyon (США, карьер) – радарная система предупреждения об обрушениях.

4. Обратный анализ (back-analysis)

Обратный анализ – метод калибровки геомеханической модели по фактическим данным мониторинга (смещения, нагрузки на крепь, сейсмичность). Позволяет уточнить неопределённые параметры: прочность массива, модуль деформации, коэффициент бокового давления, свойства крепи.

Этапы обратного анализа:

1. Сбор натурных данных – замеры конвергенции, усилий в анкерах, давления на крепь, сейсмических событий.
2. Создание предварительной численной модели (RS2, FLAC, UDEC) с начальными приближениями параметров.
3. Многовариантный расчёт – варьирование неопределённых параметров, сравнение с натурными данными.
4. Поиск оптимального набора параметров (минимизация невязки) – часто используют автоматический подбор (градиентные методы, генетические алгоритмы, нейросети).
5. Верификация – проверка на независимых данных (следующий этап мониторинга).

Следующие параметры уточняют обратным анализом:

- Прочностные свойства массива: сцепление c, угол внутреннего трения φ, параметры Хока-Брауна (GSI, m_i, D).
- Деформационные характеристики: модуль упругости E, коэффициент Пуассона ν.
- Начальное поле напряжений: коэффициент бокового давления λ, ориентация главных напряжений.
- Жёсткость крепи (для комбинированных моделей).

Пример обратного анализа

Исходные данные: горизонт 700 м, выработка арочного сечения, замеренная конвергенция через 30 суток после проходки – 25 мм. Предварительная модель при $E = 30$ ГПа дала 15 мм. Варьируя E и c в разумных пределах, получили соответствие при $E = 18$ ГПа, $c = 6$ МПа. Это говорит о том, что реальный массив более трещиноват, чем предполагалось по лабораторным образцам. Скорректированная модель используется для прогноза устойчивости следующей выработки.

5. Примеры из практики

5.1. Мониторинг сдвижений на рудниках

Пример 1: Кировский рудник (АО «Апатит») – система глубинных реперов (экстензометров) на горизонтах –800 м. Контролируется сдвижение пород кровли, вызванное отработкой камер. Данные сопоставляются с численной моделью (FLAC3D) и используются для калибровки параметров критерия Хока-Брауна.

Пример 2: Рудник «Мурунтау» (Навоийская ГРК) – на борту карьера установлены автоматические GPS-станции (12 точек), а также инклинометрические скважины глубиной до 100 м. Система раннего предупреждения с порогом 5 мм/сут позволяет вовремя останавливать работу на опасных участках.

5.2. Прогноз горных ударов

Рудники Норильска (Октябрьский, Талнахский) – развёрнута сеть микросейсмических станций (более 50 каналов). Алгоритмы в реальном времени выделяют кластеры событий, рост энергии и миграцию очагов. При превышении пороговых параметров автоматически выдаётся прогноз удароопасности и даются рекомендации по изменению режима отбойки (снижение шага, уменьшение массы заряда).

5.3. Корректировка параметров крепи по данным мониторинга

Рудник «Жезказган» (Казахмыс) – в зонах тектонических нарушений измерялись усилия в анкерах (тензометрические штанги). Выявлены участки, где нагрузки на анкеры превышали расчётные в 1,5 раза. После обратного анализа скорректирована длина анкеров (увеличена с 2,5 до 3,5 м) и установлены дополнительные разгрузочные скважины. Результат – стабилизация выработок и снижение затрат на перекрепление.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Назовите основные цели и задачи геомеханического мониторинга. Какие явления контролируются?
2. Перечислите инструментальные методы мониторинга сдвижений (экстензометры, реперы, деформографы). В чём различие между ними?
3. Что такое микросейсмическая система и для чего она применяется? Как она помогает прогнозировать горные удары?
4. Дайте определение обратному анализу (back-analysis). Какие параметры массива можно уточнить с его помощью?
5. Приведите пример успешного внедрения автоматизированной системы мониторинга на реальном горном предприятии. Каковы были результаты?

Рекомендуемая литература:

1. Mendecki A.J. Seismic Monitoring in Mines. – Chapman & Hall, 1997.
2. Brady B.H.G., Brown E.T. Rock Mechanics for Underground Mining. – Springer, 2004.
3. Фисенко Г.Л. Устойчивость горных выработок. – М.: Недра, 1976.
4. ВНИМИ. Инструкция по геомеханическому мониторингу на рудниках. – СПб., 2011.
5. Feng X.T., Hudson J.A. Rock Engineering Design. – CRC Press, 2011.