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

Лекция 8. Геомеханика очистных работ и управление горным давлением

Цель лекции: Сформировать у обучающихся понимание геомеханических процессов, происходящих в массиве при ведении очистных работ; освоить методы оценки устойчивости междукамерных и барьерных целиков; изучить основные способы управления горным давлением (оставление целиков, закладка выработанного пространства, гидроразрыв, опережающая отработка); научиться применять геомеханические критерии для снижения потерь и разубоживания руды.

План лекции:

1) Влияние очистного пространства на напряженное состояние массива: зоны опорного давления, краевые целики, подработка и надработка.

2) Оценка устойчивости междукамерных и барьерных целиков: расчет несущей способности, коэффициент запаса прочности.

3) Управление горным давлением: способы (оставление целиков, закладка выработанного пространства, гидроразрыв, опережающая отработка защитных пластов).

4) Практические методы снижения потерь и разубоживания на основе геомеханических критериев.

1. Влияние очистного пространства на напряженное состояние массива

Очистные работы (выемка полезного ископаемого) создают в массиве полости – выработанное пространство. Это приводит к коренной перестройке исходного поля напряжений. Вокруг очистного пространства формируются характерные зоны, от которых зависит устойчивость всего горного массива и сохранность окружающих выработок.

1.1. Зоны опорного давления

Опорное давление – повышенные напряжения, возникающие в массиве вблизи края выработанного пространства (перед очистным забоем, вокруг целиков). Зона опорного давления имеет вид упругого ядра, за которым следует область пониженных напряжений (разгрузка).

Основные параметры зоны опорного давления:

- Максимальное напряжение – может превышать исходное в 2–5 раз (коэффициент концентрации K 2…5).
- Расстояние от контура забоя до максимума – обычно $L = (0{,}2 \ldots 0{,}5)H$ (где H – глубина) или 5–20 м для малых глубин.
- Ширина зоны – может достигать десятков метров.

Для тонких пологих залежей опорное давление распространяется на всю панель; для мощных крутопадающих – концентрируется в боках.

1.2. Краевые целики

Краевые целики – оставляемые массивы породы у границы выработанного пространства (например, у выхода на поверхность или у границы шахтного поля). Они воспринимают основную нагрузку от налегающих пород, предотвращая обрушение и сдвижение поверхности. В них возникают высокие сжимающие напряжения, а также растягивающие (в центральной части – при изгибе). Разрушение краевого целика может привести к катастрофическим последствиям (прорыву воды, обвалу пород).

1.3. Подработка и надработка

- Подработка – ведение очистных работ ниже существующих выработок (горизонтов). При этом вышележащие породы проходят через зону опорного давления, что вызывает их деформации и, часто, разрушение.
- Надработка – очистная выемка выше существующих выработок. Здесь опасность меньше, но возможно отслоение пород кровли из-за разгрузки.

В обоих случаях подготовительные выработки, попадающие в зону влияния очистных работ, испытывают повышенные смещения (конвергенцию) и требуют усиленной крепи или специальных мероприятий (например, разгрузочных щелей).

2. Оценка устойчивости междукамерных и барьерных целиков

Целики – это неотъемлемый элемент многих систем разработки (камерно-столбовой, этажно-камерной, систем с закладкой). Их назначение:

- поддерживать кровлю и предотвращать обрушение;
- изолировать выработанные пространства (барьерные целики);
- сохранять доступ к смежным камерам.

2.1. Несущая способность целика

Прочность целика зависит от:

- прочности породы ($\sigma_{сж}$);
- формы (W/H – отношение ширины к высоте);
- трещиноватости и структурного ослабления (коэффициент K_c).

Эмпирическая формула (для кубических и блочных целиков):

$$\sigma_{цел} = \sigma_{сж} \cdot \left(0{,}64 + 0{,}36\frac{W}{H}\right) \text{ (для } W/H \leq 5)$$

Для более вытянутых целиков ($W/H > 5$) прочность приближается к прочности породы. Коэффициент, учитывающий масштабный эффект и трещиноватость: $\sigma_{цел} = \sigma_{сж} \cdot K_c \cdot f(W/H)$.

2.2. Коэффициент запаса прочности целика

Коэффициент запаса $FS = \sigma_{цел}/\sigma_{действ}$. Действующее напряжение в целике $\sigma_{действ}$ = (вес вышележащих пород + нагрузка от опорного давления) / площадь целика. Для типовых условий требуют:

• $FS \geq 1{,}5$ – для постоянных целиков;

• $FS = 1{,}2 \ldots 1{,}5$ – для временных (выемка целиков после отработки камер).

При $FS < 1$ – целик разрушается, что ведёт к потере руды и иногда к обрушению кровли.

2.3. Практические рекомендации по устойчивости целиков

• Минимальное отношение W/H для обеспечения устойчивости – 0,3…0,5 (иначе целик «пластичный», теряет несущую способность из-за бокового выпучивания).

• Для слабых пород ($f < 4$) или при наличии тектонических нарушений целики должны быть массивными ($W/H > 1{,}5$).

• В камерно-столбовой системе при $W/H < 0{,}5$ целик следует рассматривать как временный и отрабатывать после полной выемки камер с закладкой.

3. Управление горным давлением: способы и их обоснование

Управление горным давлением – совокупность мероприятий, направленных на регулирование напряжённо-деформированного состояния массива для обеспечения безопасной и экономичной отработки месторождения.

3.1. Оставление целиков (традиционный способ)

Наиболее старый метод – оставление междукамерных и барьерных целиков. Достоинства: простота, не требует закладочных материалов. Недостатки:

• потери руды (до 20–30% и более);

• концентрация напряжений, вызывающая горные удары;

• опасность лавинного обрушения при разрушении целиков.

Применяется при невысокой цене руды и благоприятных горно-геологических условиях.

3.2. Закладка выработанного пространства

Закладочный материал (твёрдая закладка – бетон, гидравлическая закладка – песчано-цементная смесь, сухая закладка – скальная порода) заполняет пустоты, снижая нагрузки на целики и предотвращая сдвижение. Преимущества:

• снижение потерь руды (можно уменьшить размеры целиков или отрабатывать их);

• уменьшение зон опорного давления;

• возможность повторной отработки целиков;

• экологичность (утилизация отходов обогащения).

К недостаткам относятся высокая стоимость и необходимость создания закладочного комплекса.

3.3. Гидроразрыв пласта

Применяется для искусственного ослабления массива (снижения концентрации напряжений) и провоцирования управляемого обрушения. В скважины закачивают жидкость под давлением, создавая трещины и разупрочняя породу. Используется при отработке мощных пологих залежей, когда целики не оставляют.

3.4. Опережающая отработка защитных пластов

Характерно для угольных шахт: сначала отрабатывают защитный пласт (часто менее ценный), ослабляя напряжённое состояние в вышележащем основном пласте. В результате снижается риск горных ударов и возрастает полнота извлечения.

3.5. Разгрузочные щели (канавки)

Прорезка узких щелей параллельно выработке (в кровле или боках) снимает концентрацию напряжений, предотвращая динамические явления. Эффективно в зонах высоких горизонтальных напряжений.

3.6. Комбинированные методы

Сочетание целиков и закладки, частичная закладка, отработка камер с оставлением временных целиков и их последующая выемка с заменой на закладку. Позволяют достичь полноты извлечения до 85–90% при приемлемых затратах.

4. Практические методы снижения потерь и разубоживания на основе геомеханических критериев

Потери руды – часть балансовых запасов, не извлечённая в процессе добычи. Разубоживание – примешивание пустой породы к рудной массе.

Геомеханические критерии позволяют прогнозировать и снижать эти показатели.

4.1. Прогноз зон возможного обрушения (по Strength Factor)

Как было рассмотрено в лекции 6, в численных моделях выделяют зоны с $SF < 1$. Объём этих зон (в пересчёте на площадь обрушения) напрямую коррелирует с разубоживанием. Формула (для одинакового удельного веса руды и породы):

$$\text{Разубоживание (\%)} = 100 \cdot \frac{S_{\text{обр}}}{S_{\text{камеры}}}$$

где $S_{\text{обр}}$ – площадь сечения зоны разрушения (по результатам моделирования), $S_{\text{камеры}}$ – площадь очистной камеры.

4.2. Оптимизация размеров камер и целиков

Используя формулы несущей способности целиков (раздел 2) и результаты моделирования, можно подобрать такие размеры, при которых:

- целики имеют запас прочности $FS \geq 1{,}5$;
- камеры имеют минимальную глубину ЗНД (SF>1.2);
- потери не превышают допустимых (обычно 5–15%).

Программные комплексы типа RS2 позволяют проводить многовариантный анализ для разных сочетаний ширины камеры и целика.

4.3. Выбор порядка отработки

Отработка через одну камеру (шахматный порядок) позволяет временно разгружать соседние целики, снижая потери и позволяя вести выемку в

нисходящем или восходящем порядке. При сплошной выемке (последовательные камеры) целики нагружаются максимально – риск потерь выше.

4.4. Учёт тектоники и анизотропии

Правильная ориентация камер относительно направления главных напряжений может снизить концентрацию напряжений в боках на 20–30%. Для этого необходимо знать азимут максимального горизонтального напряжения σ_{Hmax}.

4.5. Мониторинг и обратный анализ

Систематические замеры конвергенции, микросейсмический контроль и анализ деформаций крепи позволяют корректировать параметры отработки (уменьшать размеры камер, усиливать крепь) с целью снижения потерь и разубоживания в реальном времени.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Что такое зона опорного давления и как она влияет на устойчивость очистных и подготовительных выработок?
2. Как рассчитывается несущая способность междукамерного целика? Какие параметры (прочность, форма, масштаб) влияют на его устойчивость?
3. Назовите основные способы управления горным давлением. В чём преимущества закладки выработанного пространства перед оставлением целиков?
4. Каким образом результаты численного моделирования (зоны SF<1) можно использовать для прогноза разубоживания руды?
5. Почему порядок отработки камер (сплошной, шахматный) влияет на потери и разубоживание? Приведите пример выбора порядка отработки для камерно-столбовой системы.

Рекомендуемая литература:

1. Hoek E., Brown E.T. Underground Excavations in Rock. – IMM, 1980.
2. Brady B.H.G., Brown E.T. Rock Mechanics for Underground Mining. – Springer, 2004.
3. Зубков В.В., Зубков А.В. Геомеханика. – М.: МГГУ, 2008.
4. Вагнер И.В., Куликов В.В. Управление горным давлением при разработке рудных месторождений. – М.: Недра, 1992.
5. Рекомендации по расчёту параметров целиков (ВНИМИ).