Дисциплина «Актуальные проблемы в горном деле»
для магистрантов ОП 7М07203 "Горное дело"

Лекция 2. Геомеханические проблемы разработки месторождений на больших глубинах

Цель лекции: Сформировать у магистрантов системное понимание геомеханических процессов, протекающих в горном массиве при переходе на глубокие горизонты; изучить критерии перехода от упругого к упругопластическому и хрупкому разрушению пород; освоить методы прогноза и профилактики динамических проявлений горного давления (горных ударов, стреляния, выбросов); а также научиться оценивать устойчивость выработок и целиков в условиях высоких напряжений.

План лекции:

1) Рост горного давления, переход к упругопластическому и хрупкому разрушению пород.
2) Горные удары, стреляние, внезапные выбросы породы и газа. Методы прогноза и профилактики.
3) Устойчивость выработок и целиков в условиях высоких напряжений.

1. Рост горного давления, переход к упругопластическому и хрупкому разрушению пород

1.1. Естественное поле напряжений на больших глубинах

Современная горнодобывающая промышленность характеризуется неуклонным ростом глубин разработки. В Южной Африке рудники Mponeng Gold Mine и TauTona Mine достигли глубины около 4,0 км, в Канаде рудники Kidd Mine и Laronde Mine превышают 3,0 км, в Бразилии комплекс рудников Morro Velho ведёт добычу на глубине 3,0 км, а в России рудник «Скалистый» Заполярного филиала ПАО «ГМК «Норильский никель» - на глубине свыше 2,0 км.

С увеличением глубины горных работ поведение пород и устойчивость выработок всё больше зависит от напряжённого состояния массива. Вертикальное напряжение σ_v на глубине H определяется весом вышележащих пород:

$$\sigma_v = \gamma H$$

При среднем удельном весе пород γ = 2,7 т/м³ на глубине 1000 м вертикальное напряжение составляет около 27 МПа, на глубине 2000 м около 54 МПа, на глубине 4000 м свыше 100 МПа. Однако поле напряжений не является гидростатическим: горизонтальные напряжения $\sigma_h = \lambda\sigma_v$, где коэффициент

бокового давления λ может значительно отличаться от 1,0 в зависимости от тектонической обстановки.

1.2. Переход к упругопластическому и хрупкому разрушению

По мере роста глубины меняется сам характер деформирования и разрушения горных пород. В приповерхностных условиях преобладает упругое поведение: после снятия нагрузки деформации полностью восстанавливаются. С увеличением глубины и, соответственно, уровня действующих напряжений, породы переходят в упругопластическую область, где возникают необратимые (остаточные) деформации. При дальнейшем росте напряжений наступает хрупкое разрушение, характеризующееся внезапной потерей несущей способности и высвобождением накопленной упругой энергии.

Как отмечается в специальном выпуске «Failure Characteristics of Deep Rocks», посвящённом механизмам разрушения горных пород в глубинных геологических условиях, важнейшими факторами, определяющими поведение пород, являются высокая напряжённость, повышенные температуры и сложные геологические структуры. Проводимые исследования направлены на изучение механических свойств глубоких пород – прочности, деформационных характеристик и хрупкости, а также на анализ того, как скорость деформации и обжимающее давление влияют на режимы разрушения.

Ключевой проблемой является предел упругости породы – максимальное напряжение, при котором деформации ещё полностью обратимы. При превышении этого предела возникает зона неупругих деформаций (ЗНД), которая может распространяться на значительную глубину от контура выработки.

1.3. Современные критерии прочности для глубоких пород

Для точного прогнозирования поведения пород на больших глубинах недостаточно классического критерия Кулона-Мора. Наибольшее распространение получил критерий прочности Хока-Брауна, который в модифицированной форме позволяет описывать нелинейный переход от хрупкого к пластическому поведению.

В исследовании 2025 года предложена модель CTM (Confinement-dependent Transient mi Model) – усовершенствование критерия Хока-Брауна, учитывающее зависимость параметра mi от уровня обжимающего давления. Эта модель позволяет эффективно описывать полную нелинейную эволюцию прочности породы – от докритического состояния до разрушения – при различных обжимающих напряжениях.

Особый интерес представляет интерпретация переходного параметра mi как индекса хрупкости: более высокие значения mi указывают на большую хрупкость породы и, следовательно, на повышенный риск внезапного хрупкого разрушения (горных ударов), тогда как низкие значения отражают повышенную пластичность.

1.4. Влияние повышенных температур и тектоники

Помимо роста напряжений, на больших глубинах возрастает геотермический градиент. Температура пород может достигать 40-50°С и более, что дополнительно снижает прочностные свойства и усиливает пластическое течение. Как отмечается в исследованиях по шахте «Глубокая» рудника «Скалистый», основными проблемами глубоких горизонтов являются высокие температуры, горные удары, водоотлив и нестабильность породного массива.

Кроме того, тектонические напряжения (остаточные и современные) могут в несколько раз превышать гравитационные. Их ориентация и величина оказывают решающее влияние на устойчивость выработок: наиболее опасны трещины и нарушения, падающие в сторону выработки.

2. Горные удары, стреляние, внезапные выбросы породы и газа. Методы прогноза и профилактики

2.1. Горные удары и стреляние

Горный удар – это внезапное хрупкое разрушение приконтурной части массива, сопровождающееся резким выплеском накопленной упругой энергии, выбросом обломков породы, звуковым эффектом (хлопком) и сейсмической волной. Горные удары представляют большую опасность для жизни и здоровья горняков, а также приводят к масштабным повреждениям подземной инфраструктуры и горной техники.

Стреляние – менее интенсивная форма динамических проявлений, проявляющаяся в виде мелких трещин, отслоений чешуек и пластин породы с характерным звуком. Стреляние часто является предвестником более крупных горных ударов.

Согласно исследованиям Североуральских бокситовых месторождений, активизация геодинамических процессов на больших глубинах приводит к непредсказуемым авариям, что обусловливает необходимость решения проблемы геодинамической безопасности.

2.2. Внезапные выбросы породы и газа

Внезапный выброс – быстрое (в течение нескольких секунд) разрушение призабойной части массива с выносом большого количества породы (до сотен тонн) и газа в горную выработку. Явление характерно для угольных пластов, каменной соли, карбонатных пород.

Исследования компании ALROSA (Якутия) показывают, что карбонатные породы (доломиты, известняки) на глубинах 1000-1200 м и более становятся природно-газодинамически опасными и способны к внезапным выбросам породы и газа под воздействием буровзрывных работ высокоэнергетического механического воздействия.

2.3. Прогноз динамических явлений

Прогноз горных ударов и выбросов базируется на комплексе методов:

• Эмпирические методы основаны на рейтинговых классификациях (RMR, Q-system, специализированные шкалы удароопасности).

• Аналитические методы включают расчёт коэффициента концентрации напряжений, энергетических критериев, показателей удароопасности.

• Инструментальный мониторинг – регистрация микросейсмической активности, измерение напряжений методом разгрузки, акустическая эмиссия.

Современные исследования демонстрируют высокую эффективность применения глубокого обучения для прогноза риска горных ударов по микросейсмическим данным. В работе Zhang X. и соавторов предложен алгоритм прогнозирования на основе свёрточной нейронной сети (CNN) и рекуррентной нейронной сети с управляемыми вентилями (GRU), позволяющий учитывать пространственно-временные характеристики микросейсмических событий.

Разработана также система предиктивного управления разгрузочным взрыванием с использованием численного моделирования (статического и динамического), полевого мониторинга разрушения пород (георадар, визуализация скважин) и машинного обучения.

На Североуральских бокситовых месторождениях реализуется программа «Геодинамическая безопасность глубоких горизонтов SUBR» на 2024-2025 годы, в рамках которой рекомендуется использовать специализированное программное обеспечение PRESS 3D URAL для моделирования НДС с учётом скачкообразного деформирования блочного массива.

2.4. Профилактика динамических явлений

Меры профилактики включают:

• Разгрузочные мероприятия: щелевая разгрузка, разгрузочное бурение, гидроразрыв пласта.

• Сейсмически безопасное ведение взрывных работ: оптимизация параметров БВР, применение эмульсионных ВВ.

• Управление порядком отработки: оставление разгрузочных камер и целиков.

• Крепление выработок податливыми конструкциями, способными воспринимать динамические нагрузки.

• Отработка защитных пластов (для угольных шахт).

3. Устойчивость выработок и целиков в условиях высоких напряжений

3.1. Особенности деформирования глубоких выработок

На глубоких горизонтах традиционные методы оценки устойчивости, основанные на законе Кулона-Мора и статической прочности образцов, часто дают неудовлетворительные результаты. Основные особенности:

• Зоны неупругих деформаций достигают значительной глубины (до нескольких метров от контура) даже в крепких породах.

• Времязависимые процессы (ползучесть) становятся существенными, особенно в пластичных породах (соль, глины, каменная соль, глинистые сланцы).

• Рост напряжений вызывает не только локальные разрушения, но и перераспределение нагрузки на целики и крепь.

Для прогнозирования устойчивости глубоких выработок используются аналитические, эмпирические и численные методы. Аналитические методы успешно применяются для определения напряжений и деформаций вблизи протяжённых выработок простого поперечного сечения (круглого и эллиптического). Эмпирические методы в большинстве случаев основаны на качественных характеристиках пород и рейтингах устойчивости массивов (RMR, Q-system).

3.2. Рейтинговые классификации для глубоких горизонтов

Традиционные классификации (RMR, Q) требуют корректировки при применении к глубоким горизонтам:

• RMR (Rock Mass Rating), предложенный Бенявским, хорошо работает для неглубоких выработок (H < 500 м).

• Q-system Бартона более чувствительна к напряжённому состоянию (через параметр SRF – Stress Reduction Factor).

• Для глубоких горизонтов целесообразно использовать модифицированный GSI (Geological Strength Index), являющийся входным параметром для критерия Хока-Брауна.

3.3. Устойчивость междукамерных и барьерных целиков

В условиях высоких напряжений целики подвергаются значительным нагрузкам. Прочность целика зависит от соотношения ширины и высоты (W/H). Эмпирическая формула для кубических и блочных целиков:

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

Коэффициент запаса прочности: $FS = \sigma_{\text{цел}}/\sigma_{\text{действ}}$. Для глубоких горизонтов минимальный запас рекомендуется:

• FS ≥ 1,5 – для постоянных капитальных целиков;

• FS ≥ 1,3 – для временных целиков (при последующей выемке).

При $W/H < 0{,}3$ целик становится пластичным и теряет несущую способность из-за бокового выпучивания.

3.4. Современные методы моделирования

Интенсивное развитие численных методов связано с совершенствованием компьютерной техники и программного обеспечения, позволяющего реализовать методы конечных, граничных и дискретных элементов в плоской и пространственной постановке.

Наибольшее распространение получили:

• МКЭ (RS2/RS3, PLAXIS, Phase2) – для расчёта НДС и устойчивости выработок.

• МКР (FLAC2D/3D) – для моделирования пластических деформаций и задач с большими смещениями.

• МДЭ (UDEC/3DEC) – для трещиноватых и блочных массивов.

Сегодня с использованием этих методов успешно решается широчайший класс геомеханических задач – от определения полей напряжений в крупных геологических структурах до изучения специфических особенностей контактного взаимодействия крепи и пород.

3.5. Управление устойчивостью и крепление

Для обеспечения устойчивости выработок и целиков на глубоких горизонтах применяются:

- Податливая крепь (фрикционные узлы, демпфирующие анкеры) для восприятия динамических нагрузок.
- Комбинированная крепь: анкеры + набрызг-бетон + разгрузочные скважины.
- Закладка выработанного пространства для снижения нагрузки на целики.
- Системы непрерывного мониторинга (автоматизированные станции с передачей данных на поверхность) для раннего обнаружения деформаций и своевременного принятия мер.

Залогом успешного применения любого из рассмотренных методов является наличие полной и объективной геологической и геомеханической информации об изучаемом объекте. При освоении глубоких и сверхглубоких месторождений получение таких данных становится критически важным.

Глубины освоения земных недр постоянно растут, и, как показывает опыт эксплуатации рудников в Южной Африке, Канаде и России, безопасное ведение горных работ на глубоких горизонтах возможно только при условии применения современных методов прогноза динамических явлений, адекватных критериев прочности и систем управления геомеханическими процессами.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Как изменяется характер деформирования пород с ростом глубины? В чём различие между упругим, упругопластическим и хрупким поведением?
2. Что такое горный удар и стреляние? Каковы основные причины этих явлений и какие методы используются для их прогноза?
3. В чём сущность критерия прочности Хока-Брауна? Что означает параметр m_i и как он связан с хрупкостью породы?
4. Как отличаются методы оценки устойчивости выработок на больших глубинах от методов для приповерхностных условий? Какие классификации наиболее применимы?
5. Какие факторы влияют на несущую способность целика в условиях высоких напряжений? Каков минимальный рекомендуемый запас прочности для глубоких горизонтов?

Рекомендуемая литература:

1. Hoek E., Brown E.T. Underground Excavations in Rock. – London: 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. Failure Characteristics of Deep Rocks // Frontiers in Earth Science (Special Issue), 2025.
5. Sidorov D.V., Shadrin M.A., Minzaripov R.G. Improvement of geodynamic safety of mining at the North Urals bauxite deposits at great depths // Gornyi Zhurnal. 2025. № 1.
6. Zhang X. et al. A prototype-based rockburst types and risk prediction algorithm considering intra-class variance and inter-class distance of microseismic data // Frontiers in Earth Science. 2025. Vol. 13.
7. Плешко М.С. Геомеханическое сопровождение и мониторинг при строительстве глубоких горных выработок. 2025.