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

Лекция 4. Управление устойчивостью горных выработок и крепление в сложных условиях

Цель лекции: Сформировать у магистрантов системное понимание современных подходов к проектированию крепи горных выработок на основе численного моделирования и рейтинговых классификаций; изучить специфику крепления в сложных горно-геологических условиях (зоны тектонических нарушений, ползучие и обводнённые породы); а также ознакомиться с инновационными типами крепи (полимерные анкеры, композитная крепь, податливые системы).

План лекции:

1) Современные подходы к проектированию крепи на основе численного моделирования и рейтинговых классификаций.
2) Проблемы крепления в зонах тектонических нарушений, в ползучих и обводнённых породах.
3) Инновационные типы крепи: полимерные анкеры, композитная крепь, податливые системы.

1. Современные подходы к проектированию крепи

Проектирование крепи горных выработок в современной геомеханике базируется на трёх основных методологических подходах, которые взаимно дополняют друг друга: эмпирические методы (рейтинговые классификации), аналитические методы (замкнутые решения) и численные расчёты (МКЭ, МДЭ и др.). При этом на предварительных стадиях проектирования и в несложных условиях часто достаточно эмпирических и аналитических подходов, тогда как в сложных условиях (большие глубины, зоны нарушений, анизотропия) применение численного моделирования становится необходимым.

1.1. Эмпирические методы: рейтинговые классификации

Наиболее распространёнными системами классификации массива горных пород, используемыми при проектировании крепи, являются методы RMR (Rock Mass Rating, количественная оценка по шести параметрам), Q-system (система Бартона, учитывающая также водность и напряжённое состояние через параметр SRF) и GSI (Геологический индекс прочности).

- Система RMR позволяет комплексно оценить поведение массива и даёт эмпирически обоснованные рекомендации по шагу анкеров, толщине торкрет-бетона и необходимости установки рам для различных классов устойчивости. Исследования показывают, что RMR даёт наиболее достоверные результаты при

переходе от свойств образца (по керну) к свойствам массива, особенно в осложнённых тектоникой условиях.

• Q-system фокусируется на размере блоков, взаимодействии трещин, их заполнителе, водных условиях и действующих напряжениях. На основе значения Q вычисляется эквивалентный пролет выработки $B = 2 \cdot ESR \cdot Q^{0.4}$, что позволяет обоснованно выбирать параметры крепи.

• GSI обеспечивает количественную оценку прочности и поведения массива на основе геологических характеристик (параметры трещин, выветрелость) и является основным входным параметром для нелинейного критерия Хока-Брауна. Его преимущество – в прямой привязке к механическим свойствам массива, однако он требует детального геологического картирования.

Полученные по этим системам оценки используются для расчёта модуля деформации массива и напряжений на контуре крепи. Для решения задач, требующих особой точности, рекомендуется использовать одновременно несколько классификаций (например, RMR и Q), что позволяет компенсировать субъективность интерпретации отдельных параметров.

1.2. Аналитические и численные методы

Аналитические методы основаны на замкнутых решениях для выработок простой (круглой) формы и могут дать приемлемые для практики оценки при упрощённых граничных условиях, однако их применение ограничено сложными рельефами и неоднородностью массива.

Численные же методы, главным образом метод конечных элементов (МКЭ), стали стандартом при проектировании крепи в сложных условиях. Они позволяют моделировать поэтапную выемку, установку крепи, нелинейное поведение пород и сложную геометрию выработок. Наиболее распространённые программные пакеты:

• RS2/RS3 (Rocscience) и Phase2 позволяют проводить многовариантные расчёты напряжённо-деформированного состояния (НДС) с учётом критериев прочности Кулона-Мора и Хока-Брауна, а также рассчитывать усилия в анкерной крепи и деформации контура выработки.

• FLAC2D/FLAC3D (метод конечных разностей) лучше подходит для моделирования больших пластических деформаций и учёта ползучести.

• UDEC/3DEC (метод дискретных элементов) необходим для сильнотрещиноватых и блочных массивов, где сплошная среда не даёт достоверных результатов.

2. Проблемы крепления в сложных условиях

Сложные горно-геологические условия (зоны тектонических нарушений, ползучие и обводнённые породы резко снижают эффективность традиционных решений и требуют особых подходов.

2.1. Крепление в зонах тектонических нарушений

Зоны тектонически-ослабленных пород характеризуются высокой трещиноватостью и раздробленностью блоков от нескольких миллиметров до

десятков сантиметров. В этих зонах прочность и сцепление пород существенно снижаются, а сходимость контура выработки может превышать допустимые значения в несколько раз и достигать 50-100 см и более. При этом в самой тектонической зоне обычно не образуется значительных напряжений, поэтому выработку следует рассматривать как ослабленную, а породный массив как несвязный с возможным свободным обрушением мелкоблочной массы.

В таких условиях эффективно применение комбинированной многоуровневой крепи: тяжелая арочная металлическая крепь (двутавры или спецпрофили) в сочетании с анкерным усилением контура и последующим торкретированием, а иногда и с опережающим нагнетанием цементных или полиуретановых составов для скрепления массива. Если позволяет геометрия выработки, траекторию её проходки рекомендуется прокладывать в стороне от зоны влияния крупного нарушения, а при вынужденном пересечении – предварительно разгружать массив бурением скважин и укреплять его инъекциями. Особенно опасны в этом отношении дизъюнктивные нарушения, служащие концентраторами напряжений и путями для притока воды. В таких случаях крепь должна быть способна воспринимать не только статические, но и повышенные динамические нагрузки.

2.2. Крепление в ползучих породах

Ползучие породы (соли, аргиллиты, глинистые сланцы при повышенной влажности) характеризуются нелинейной зависимостью деформаций от времени и возможностью практически неограниченного смещения контура выработки. Решающим фактором становится скорость нарастания смещений. Если она не затухает, а сохраняется или растёт, порода вскоре переходит в стадию прогрессирующего разрушения. В таких условиях необходима податливая крепь, способная воспринимать нагрузку и одновременно деформироваться, не ломаясь. Исследования анкерной крепи в ползучих породах показали высокую эффективность анкеров с ограниченной податливостью (демпфирующими муфтами или специальными конструкциями замка).

2.3. Крепление в обводнённых породах

В обводнённых породах вода выступает как фактор снижения прочности (эффект Ребиндера и увеличение порового давления), а также как агент, вызывающий суффозию и размокание пород. В таких условиях критическими становятся не только механическая устойчивость, но и гидроизоляция выработки. Решающее значение приобретает комбинация опорно-анкерного крепления с дренажными и тампонажными мероприятиями.

- При умеренном водопритоке до 10 м³/ч обычно достаточно применения комбинированного крепления (рамы́ или анкеры с торкрет-бетоном); увеличение количества анкеров напрямую снижает скорость трещинообразования и, соответственно, замедляет рост водопритоков.
- При высоких водопритоках (более 10 м³/ч) требуется предварительное закрепление пород химическими составами и установка усиленной крепи, вплоть

до чугунных тюбингов. В слабых, водонасыщенных породах (глины, мергели) необходимо предусматривать дренаж закрепного пространства для отвода воды и предотвращения разрушения крепи изнутри.

3. Инновационные типы крепи

Современное развитие материаловедения и компьютерных технологий привело к созданию ряда инновационных крепёжных систем.

3.1. Полимерные композитные анкеры

В России и Казахстане разработаны и выпускаются полимерные композитные анкеры (ГОСТ Р 58199-2018), изготавливаемые из стекло-, угле-, базальто- или арамидокомпозита, армированного волокнами в полимерном связующем. Они отличаются:

- высокой коррозионной стойкостью и устойчивостью к агрессивным шахтным водам;
- лёгкостью (в 3-5 раз легче стальных аналогов), что облегчает монтаж;
- низкой электропроводностью (важно в угольных шахтах);
- прочностью на растяжение до 800-1200 МПа;
- способностью работать как в условиях взрывных и знакопеременных нагрузок, так и в агрессивной химической среде.

Недостатком является более низкая прочность на сдвиг по сравнению со стальными анкерами. Они особенно эффективны в зонах тектонических нарушений и обводнённых породах, где сталь быстро корродирует, а также в креплении выработок с большим сроком службы. В Казахстане такие анкеры уже прошли промышленную апробацию на ряде предприятий (договоры АО «АрселорМиттал Темиртау», ТОО «Корпорация Казахмыс», АО «Казцинк»).

3.2. Податливая анкерная крепь

Для крепления выработок в ползучих и подверженных горным ударам массивах широко используются анкеры с блоком податливости (специальные муфты, телескопические стержни или устройства с контролируемым усилием расклинивания). Они позволяют воспринимать большие деформации (до 150-300 мм) без разрыва крепи, обеспечивая безопасность при динамических нагрузках. Расчёт натяжения таких анкеров учитывает не только вес потенциального свода обрушения, но и длительную ползучесть массива.

3.3. Перспективные разработки

Интересные результаты дают исследования по созданию самозатягивающихся анкеров, в которых усилие затяжки увеличивается при ослаблении сцепления с породой (за счёт клина или цанги, вдавливаемой в стенки шпура под действием распора пород), а также разбуриваемых анкеров из композитов (RFPA – rockfall protective anchors), способных работать в сильнообводнённых трещиноватых породах и в условиях частых динамических знакопеременных нагрузок. Хотя опыт их внедрения пока невелик, они рассматриваются как одно из перспективных направлений для крепления выработок на глубоких горизонтах в зонах повышенной

тектонической активности. Область применения анкерной крепи в целом постоянно расширяется.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. В чём преимущество использования одновременно нескольких рейтинговых классификаций (например, RMR и Q) при проектировании крепи?
2. Почему зона тектонического нарушения считается резко ослабленной, и какие типы крепи наиболее эффективны при её пересечении?
3. Каковы причины повышенных деформаций в ползучих породах и почему в них необходима податливая крепь?
4. Перечислите основные методы гидроизоляции обводнённых выработок (от тампонажа до комбинированной крепи).
5. Назовите преимущества полимерных композитных анкеров перед стальными аналогами (коррозионная стойкость, масса, электропроводность, прочность). В каких крепёжных системах и на каких горизонтах они наиболее эффективны?

Рекомендуемая литература

1. Bieniawski Z.T. Engineering Rock Mass Classifications. - New York: Wiley, 1989. - 251 p. (Классификация RMR и практические рекомендации по креплению выработок)
2. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support // Rock Mechanics. - 1974. - Vol. 6, № 4. - P. 189-236. (Оригинальная публикация Q-system)
3. Barton N. Rational Design for Tunnel Ground Support with Membranes Based on the Geomechanically Classification of Q by Barton // SPE/SEG. - 2023. (Развитие Q-системы для глубоких горизонтов)
4. Hoek E., Brown E.T. Underground Excavations in Rock. - London: IMM, 1980. - 527 p. (Теоретические основы крепления выработок, критерий Хока-Брауна)
5. Brady B.H.G., Brown E.T. Rock Mechanics for Underground Mining. - 3rd ed. - Springer, 2004. - 628 p. (Современные методы управления устойчивостью)
6. Лабшер Д.Х., Якубек Я. Классификация MRMR для трещиноватых массивов горных пород. - Studmed, 2022. (Адаптация RMR для применения в зонах тектонических нарушений и обводнённых породах)
7. Зубков В.В., Зубков А.В. Геомеханика. - М.: Издательство МГГУ, 2008. - 512 с. (Методы расчёта крепи и оценка устойчивости выработок)
8. Комаров Е.И. Геотехнология: подземные горные выработки и их крепление: Учебное пособие. - М.: ЗНАНИУМ, 2026. (Современные способы крепления и охраны выработок)

9. Очкуров В.И., Протосеня А.Г. Строительство горных выработок в примерах и задачах: Учебное пособие. - 2023. (Практическое применение теоретических знаний для крепления выработок)

10. ГОСТ Р 58199-2018. Оборудование горно-шахтное. Крепь анкерная из полимерных композитов. Общие технические условия. - М.: Стандартинформ, 2018. (Национальный стандарт на полимерные композитные анкеры)

11. D5878-19. Standard Guides for Using Rock-Mass Classification Systems for Engineering Purposes (ASTM). ASTM International. (Руководство по применению систем классификации массивов, включая RMR и Q)

12. **Research into technology of fastening the mine workings in the conditions of unstable masses // Научная статья. Mining Journal, 2021. (Применение численного моделирования в RS2 для выбора оптимального типа крепления)

13. **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВИДА КРЕПЛЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ // Горный журнал Казахстана. - 2024. (Прогнозирование НДС вокруг выработок на Хромтауском месторождении с помощью RS2).