

Лекция 10. Инновационные геотехнологии для рационального использования ресурсов недр

Цель лекции: познакомить с перспективными способами добычи и переработки, позволяющими извлекать ресурсы с минимальными потерями и воздействием.

План лекции:

1. Скважинная гидродобыча (СГД) для глубоких руд и техногенных образований.
2. Подземное выщелачивание (ПВ) урана, меди, золота: условия применимости, минимизация потерь.
3. Физико-техническая геотехнология: использование выемочных модулей без крепления, камерная разработка с закладкой.
4. Роботизированные комплексы и беспилотная техника (снижение разубоживания за счёт точной выемки).
5. Комбинированные методы: карьерно-шахтная отработка глубоких горизонтов.
6. Цифровые двойники рудника для оптимизации использования запасов.

В условиях истощения богатых руд, роста глубины разработки и ужесточения экологических требований, традиционные методы добычи становятся всё менее эффективными. На смену им приходят инновационные геотехнологии, которые позволяют извлекать полезные ископаемые из труднодоступных месторождений, вовлекать в переработку техногенные образования и минимизировать воздействие на окружающую среду.

1. Скважинная гидродобыча (СГД) для глубоких руд и техногенных образований

1.1. Сущность и область применения

Скважинная гидродобыча (СГД) представляет собой технологию добычи полезных ископаемых из глубокозалегающих месторождений, при которой рудная масса разрушается, пульпируется и транспортируется на поверхность по скважинам с использованием гидравлической энергии. Эта технология особенно эффективна для рыхлых и слабосцементированных пород, залегающих на больших глубинах.

Технология СГД представляет огромный интерес для добычи богатых железных руд, залегающих на больших глубинах (600-900 м). В России впервые была реализована скважинная гидродобыча с больших глубин (600-800 м). Также технология применяется для добычи руд из техногенных

образований, где она позволяет извлекать остаточные ценные компоненты без необходимости строительства дорогостоящих подземных выработок.

Основные элементы технологии СГД:

- Бурение скважин до рудного тела.
- Расширение призабойной зоны скважины для обеспечения устойчивой работы добычных устройств.
- Гидромониторное разрушение руды в забое.
- Транспортировка гидросмеси (пульпы) на поверхность.
- Обезвоживание и складирование рудной массы.

1.2. Технологический процесс

Метод скважинной гидродобычи требует обязательного расширения скважины в зоне рудного пласта для обеспечения устойчивой и более эффективной работы добычных устройств (гидроэлеваторов, гидромониторов и др.). Диаметр расширенной части в зоне рудного пласта должен обеспечивать свободное размещение оборудования и эффективное разрушение породы.

Процесс добычи включает:

1. Разрушение руды – гидромониторами, создающими высоконапорные струи воды.
2. Пульпирование – смешивание разрушенной руды с водой до состояния гидросмеси.
3. Гидротранспорт – подъём пульпы по скважине с помощью гидроэлеваторов или эрлифтов.
4. Обезвоживание – отделение твёрдой фазы от воды на поверхности.

1.3. Преимущества и ограничения

Преимущества СГД:

- Возможность добычи руд с больших глубин (до 800 м и более).
- Отсутствие необходимости в проходке дорогостоящих капитальных выработок.
- Минимальное нарушение земной поверхности.
- Высокая производительность и возможность автоматизации.
- Эффективность при разработке техногенных образований.

Ограничения и вызовы:

- Применимость только для рыхлых, слабосцементированных и трещиноватых пород.
- Необходимость решения проблемы водоотлива и очистки шахтных вод.
- Риск образования зон сдвижения и обрушения в массиве.
- Высокие требования к качеству цементирования скважин и охране водных горизонтов.

Эффективность применения систем разработки при СГД связана с полнотой извлечения запасов руды из недр при условии обеспечения

безопасного ведения горных работ. Обоснование рациональных проектных решений для промышленного предприятия СГД может быть получено на базе опытных работ, наиболее отвечающих основным требованиям технологического процесса.

2. Подземное выщелачивание (ПВ) урана, меди, золота

2.1. Сущность и принципы метода

Подземное выщелачивание (ПВ) – метод добычи металлов, основанный на избирательном растворении ценных компонентов непосредственно в массиве с последующим извлечением продуктивных растворов на поверхность. Метод позволяет вовлекать в разработку бедные и труднообогатимые руды, которые не могут быть переработаны традиционными методами.

2.2. Условия применимости

Главные условия успешного применения подземного выщелачивания - достаточная естественная водопроницаемость руд или возможность её создания искусственным путём. Ключевыми факторами успешного выщелачивания для золота, серебра, меди и урана являются проницаемость, доставка раствора к руде и извлечение раствора.

Основные условия применимости ПВ:

- Проницаемость – руды должны быть водопроницаемыми или поддаваться искусственному разрыхлению.
- Минеральный состав – ценный компонент должен быть доступен для химического растворения.
- Гидрогеологические условия – наличие водоупора для локализации растворов.
- Экономическая целесообразность – стоимость извлечения должна быть ниже стоимости традиционной добычи.

Основным условием применения скважинного подземного выщелачивания золота является то обстоятельство, что руда должна залегать в обводнённых проницаемых отложениях.

2.3. Применение для различных металлов

Уран: ПВ является основным методом добычи урана в Казахстане (скважинное подземное выщелачивание), что обеспечивает низкую себестоимость производства и минимальное воздействие на окружающую среду.

Золото: Ведутся экспериментальные работы для внедрения ПВ на месторождениях руд золота. Для золота и других металлов предлагается выщелачивание проводить раствором тиосульфата аммония в присутствии меди. Перед проведением ПВ проводят предварительное осушение верхней части месторождений, отработку обводнённых и осушённых рудных тел проводят отдельно.

Медь: Кучное выщелачивание широко применяется для извлечения меди из бедных руд.

Другие металлы: Изобретения и патенты предлагают комбинированные способы подземного выщелачивания руд, в том числе таких, как уран, медь, золото и других металлов.

2.4. Минимизация потерь и экологические аспекты

Для минимизации потерь при ПВ необходимо:

- Тщательное геологическое и гидрогеологическое моделирование.
- Оптимизация реагентного режима.
- Контроль за распространением растворов в массиве.
- Своевременная рекультивация участков выщелачивания.

Важным преимуществом ПВ является отсутствие необходимости строительства хвостохранилищ и отвалов вскрышных пород, что существенно снижает экологическую нагрузку. Однако требуется строгий контроль за герметичностью скважин и предотвращение утечек продуктивных растворов в водоносные горизонты.

3. Физико-техническая геотехнология

Физико-техническая геотехнология объединяет методы добычи, основанные на механическом разрушении горных пород с использованием специальных выемочных модулей, камерных систем разработки и закладочных материалов.

3.1. Использование выемочных модулей без крепления

Применение выемочных модулей без крепления позволяет отказаться от дорогостоящих систем крепления в устойчивых породах. Модульная выемка предполагает разделение рудного массива на блоки (модули), которые отрабатываются в определённой последовательности с использованием самообрушения или управляемого обрушения пород.

Этот подход особенно эффективен при разработке мощных рудных тел в устойчивых породах, где возможно ведение очистных работ без постоянного крепления с использованием временных целиков или закладочных материалов.

3.2. Камерная разработка с закладкой

Камерная система разработки с закладкой является одной из наиболее распространённых и экологически безопасных систем подземной добычи.

Основные элементы камерной системы с закладкой:

- Разделение рудного тела на камеры (выемочные блоки) и целики.
- Отработка камер с последующим заполнением выработанного пространства закладочным материалом.
- Использование закладки для управления горным давлением и снижения потерь руды.

Рассмотрена камерная система отработки подкарьерных запасов крутопадающих рудных тел малой и средней мощности с использованием

бутобетонной и породной закладки для управления состоянием горного массива. Технология предусматривает восходящую выемку.

Обосновано применение подэтажно-камерной системы разработки с закладкой с нисходящей и восходящей выемкой для отработки Северного рудного тела Орловского месторождения.

Преимущества камерной системы с закладкой:

- Высокая полнота извлечения запасов (до 85-95%).
- Управление горным давлением и снижение риска обрушений.
- Возможность отработки месторождений под охраняемыми объектами.
- Снижение потерь и разубоживания руды.

Применение камерной системы разработки с закладкой при выемке запасов рудника «Мир-Глубокий» демонстрирует эффективность этого метода для глубоких горизонтов.

4. Роботизированные комплексы и беспилотная техника

Внедрение роботизированных комплексов и беспилотной техники в горном деле позволяет существенно повысить точность выемки, снизить разубоживание и улучшить безопасность работ.

4.1. Беспилотные самосвалы и автономная техника

Развитие беспилотных технологий в горной отрасли идёт быстрыми темпами. Компания «Ростех» вместе с белорусским заводом БЕЛАЗ учредили новую компанию – «Роблекс» – для создания экологичных и умных машин, повышающих безопасность и сокращающих углеродный след.

Комплекс роботизации карьерных самосвалов позволяет выполнять перевозку горной массы без участия водителя - включая движение по маршруту, маневрирование и разгрузку. Проект направлен на повышение эффективности использования техники в подземной добыче и снижение присутствия людей в опасных зонах.

На угольном месторождении ERG беспилотная техника перевезла свыше 1 млн тонн горной массы. Использование современных технологий позволило минимизировать человеческий фактор. Сейчас комплекс роботизированной техники обслуживают два человека.

4.2. Автономные бутобои и роботизированное оборудование

Совместная разработка технологической компании Рексофт и «Норильского Никеля» – «Автономный бутобой с ИИ-управлением» – признана лучшей в конкурсе «Горная индустрия 4.0». Бутобой оснащён камерами высокого разрешения и лидарами для точного определения своего положения и окружающей обстановки, что позволяет непрерывно мониторить рабочий процесс.

Подтверждённый прирост производительности бутобоев – как в ходе смены, так и между ними – достигает 30% за счёт сокращения простоев.

4.3. Применение БПЛА в горном деле

Беспилотные летательные аппараты находят применение для устранения технологических нарушений в условиях подземного рудника. Запускаемые в недоступные для человека зоны, БПЛА позволяют проводить инспекции, мониторинг и выполнять задачи в опасных условиях без риска для персонала.

4.4. Влияние на снижение разубоживания

Роботизация и беспилотные технологии позволяют существенно снизить разубоживание за счёт:

- Точного позиционирования и управления горным оборудованием.
- Минимизации человеческого фактора и ошибок при выемке.
- Возможности непрерывного контроля и корректировки процесса.
- Селективной выемки с высокой точностью.

5. Комбинированные методы: карьерно-шахтная отработка глубоких горизонтов

Комбинированная (открыто-подземная) разработка месторождений позволяет наиболее эффективно извлекать запасы, залегающие на разных глубинах, и продлевать срок службы горных предприятий.

5.1. Сущность комбинированной разработки

Комбинированный способ разработки предполагает последовательную или параллельную отработку месторождения открытым и подземным способами. При этом открытые горные работы ведутся до определённой глубины, после чего добыча продолжается подземным способом.

Представлены новые научно обоснованные геотехнологические решения по сохранению устойчивости функционирования горнорудных предприятий за счёт поэтапного вскрытия запасов глубоких горизонтов при открытой и комбинированной отработке крутопадающих месторождений.

5.2. Технологические схемы

Обоснована целесообразность применения крутонаклонных подъемников в карьере при комбинированном способе разработки месторождений. Предлагается изменение схемы вскрытия с устройством конвейерного или скипового подъемника в карьере с целью повышения эффективности комбинированной отработки месторождений.

На примере месторождения Мурунтау показаны возможности комбинированной разработки открыто-подземным способом с учётом изменчивости геометрии распространения. Оработку внекарьерных запасов месторождения Мурунтау намечается вести подземным способом с использованием для их вскрытия отработанных уступов карьера.

Разработаны и защищены авторскими свидетельствами два варианта комбинированного открыто-подземного способа разработки придонных и подкарьерных запасов.

5.3. Преимущества комбинированной разработки

- Максимальное извлечение запасов – позволяет отрабатывать глубокие горизонты, недоступные для открытых работ.

- Снижение капитальных затрат – использование существующей инфраструктуры карьера для подземных работ.

- Повышение безопасности – поэтапная отработка позволяет контролировать горное давление.

- Гибкость – возможность адаптации к изменяющимся горно-геологическим условиям.

Отработка прикарьерных запасов в этих условиях ведётся преимущественно системами с твердеющей закладкой или камерными системами с открытым выработанным пространством.

6. Цифровые двойники рудника для оптимизации использования запасов

Цифровые двойники являются ключевым инструментом современного управления горным предприятием, позволяющим оптимизировать использование запасов и повысить экономическую эффективность добычи.

6.1. Понятие и принципы создания цифрового двойника

Цифровой двойник рудника представляет собой динамическую виртуальную модель, которая отражает все аспекты горного предприятия - от геологического строения месторождения до технологических процессов добычи и переработки. Он интегрирует данные геологоразведки, эксплуатации и мониторинга для прогнозирования и оптимизации производственных процессов.

Цифровые геомеханические двойники используются для прогнозирования и оценки рисков потери запасов в проектах разработки рудных месторождений. Исследования по обеспечению геодинамической безопасности производятся на основе объёмной блочной (геолого-структурной), геодинамической и горно-геодинамической модели месторождения.

6.2. Применение для оптимизации запасов

Цифровые двойники позволяют:

- Создавать трёхмерные модели месторождения для точного подсчёта запасов.

- Оптимизировать последовательность отработки блоков.

- Прогнозировать качество рудной массы.

- Управлять содержаниями и снижать потери.

- Моделировать различные сценарии разработки.

Цифровизация влияет на оптимизацию процессов, особенно в работе с трудноизвлекаемыми запасами. Интеграция AI-решений и гибридное моделирование обеспечивают нелинейный рост операционной прибыли, помогая уменьшить энергоёмкость.

6.3. Интеграция с другими технологиями

Цифровые двойники интегрируются с:

- Геоинформационными системами (ГИС) для геологического моделирования.
- Системами мониторинга для получения данных в реальном времени.
- Системами управления производством для оптимизации загрузки оборудования и снижения скрытых потерь.
- Платформами искусственного интеллекта для предиктивной аналитики.

Ключевые преимущества цифровых двойников:

- Переход от реактивной модели управления к предиктивной.
- Снижение рисков потери запасов.
- Оптимизация планирования горных работ.
- Повышение эффективности использования оборудования.
- Улучшение безопасности за счёт прогнозирования опасных ситуаций.

Все цифровые двойники кернов объединяют в единый банк данных и делают его доступным для всех компаний. Это особенно актуально при работе с трудноизвлекаемыми запасами. Такой подход создаёт единое информационное пространство для оптимизации использования минеральных ресурсов.

Вопросы для самоконтроля

1. В чём сущность скважинной гидродобычи (СГД)? Каковы условия её применения и основные преимущества?
2. Каковы условия применимости подземного выщелачивания? Для каких металлов этот метод наиболее эффективен?
3. В чём преимущества камерной системы разработки с закладкой? Какие типы закладки применяются?
4. Как роботизированные комплексы и беспилотная техника способствуют снижению разубоживания? Приведите примеры внедрения.
5. В чём сущность комбинированного (открыто-подземного) способа разработки? Каковы его преимущества?
6. Что такое цифровой двойник рудника и как он помогает оптимизировать использование запасов?

Список использованной литературы

1. Маркшейдерское обеспечение недропользования при скважинной гидродобыче богатых железных руд
2. А.Б. Копылов, О.В. Коновалов, В.С. Сальников. Краткий анализ современного состояния скважинной геотехнологии // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2010. Вып. 1
3. В.И. Голик, М.А. Маринин. Практика подземного выщелачивания урана в блоках // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень, 2022;(6/1), С.5-20.