

Лекция 9. Энергоэффективность и сокращение углеродного следа в горном деле

Цель лекции: изучить методы снижения энергопотребления и парниковых выбросов при производстве минерального сырья.

План лекции:

1. Структура энергопотребления: дробление, измельчение, транспортировка, водоотлив.
2. Современные энергосберегающие технологии (высоковольтная электроимпульсная дезинтеграция, вертикальные мельницы, рекуперация тепла).
3. Возобновляемые источники энергии для горных предприятий (СЭС, ВЭС на отвалах карьеров).
4. Управление выбросами метана при угледобыче (дегазация, утилизация метана).
5. Углеродный налог и углеродные единицы: влияние на экономику горных проектов.
6. Примеры: переход рудников ВНР на «зелёную» энергию, проекты по улавливанию CO₂ в хвостохранилищах.

Горнодобывающая промышленность является одним из крупнейших потребителей энергии в мире. Процессы дробления, измельчения, транспортировки и водоотлива требуют значительных затрат электроэнергии и тепла. Одновременно горное дело генерирует значительные объёмы парниковых газов, включая как прямые выбросы (от сжигания топлива, дегазации метана), так и косвенные (от потребления электроэнергии). В условиях глобального энергоперехода и ужесточения климатической политики, вопросы энергоэффективности и декарбонизации становятся критическими для конкурентоспособности и устойчивости горных предприятий.

1. Структура энергопотребления на горных предприятиях

Энергопотребление на горных предприятиях распределяется между несколькими основными технологическими процессами, каждый из которых имеет свою специфику и потенциал для повышения энергоэффективности.

1.1. Дробление и измельчение

Процессы дробления и измельчения являются наиболее энергоёмкими в технологической цепочке переработки минерального сырья. Исследования показывают, что дробление и измельчение руды потребляют до 50–70% всей электроэнергии на обогатительной фабрике. Энергозатраты на измельчение зависят от многих факторов: твёрдости и хрупкости пород, крупности исходного материала, требуемой тонкости помола и типа используемого оборудования.

Основные факторы, определяющие энергоёмкость дробления и измельчения:

- Физико-механические свойства пород (прочность, трещиноватость, абразивность).

- Крупность питания и требуемая крупность продукта.
- Тип дробильного и измельчительного оборудования.
- Схема и стадийность процесса.

Снижение энергозатрат на этих этапах является приоритетным направлением повышения энергоэффективности горного производства.

1.2. Транспортировка

Транспортировка горной массы и руды также вносит значительный вклад в общее энергопотребление. На открытых горных работах основными потребителями энергии являются карьерные самосвалы (дизельное топливо), конвейерные линии (электроэнергия) и железнодорожный транспорт. На подземных рудниках к ним добавляются подъёмные установки, скиповые и клетевые подъёмы, а также локомотивная откатка.

Энергоэффективность транспорта определяется:

- Расстоянием транспортировки.
- Углом наклона трасс (для конвейеров).
- Грузоподъёмностью и техническим состоянием транспортных средств.
- Схемой транспортных коммуникаций.

1.3. Водоотлив и водоснабжение

Водоотлив является одним из наиболее энергозатратных процессов на подземных рудниках, особенно при большой глубине разработки. Подъём воды с больших глубин требует значительных затрат электроэнергии, причём с ростом глубины эти затраты возрастают нелинейно.

Энергозатраты на водоотлив определяются:

- Объёмом откачиваемой воды.
- Глубиной подъёма.
- КПД насосного оборудования.
- Гидравлическим сопротивлением трубопроводов.
- Схемой водоотлива (ступенчатая или одноступенчатая).

Кроме того, на энергопотребление влияют системы вентиляции, сжатого воздуха и освещения, хотя их доля в общем энергобалансе, как правило, ниже.

2. Современные энергосберегающие технологии

2.1. Высоковольтная электроимпульсная дезинтеграция

Высоковольтная электроимпульсная дезинтеграция (High-Voltage Pulse Fragmentation, HVPF) является одной из наиболее перспективных энергосберегающих технологий, альтернативной традиционному механическому дроблению и измельчению.

Принцип действия: Высоковольтные электрические импульсы создают плазменный разряд внутри породы, который генерирует ударные волны,

приводящие к разрушению материала преимущественно по границам зёрен минералов (селективное разрушение).

Преимущества технологии:

- Существенно меньшее энергопотребление по сравнению с механическим дроблением.
- Селективное разрушение – позволяет высвободить минеральные зёрна без переизмельчения, что повышает эффективность последующего обогащения.
- Энергоэффективность растёт с увеличением неоднородности породы.
- Увеличение размера электродов повышает эффективность преобразования энергии с 40,82% до 53,06%.

Технология HVRF в последние годы активно развивается и рассматривается как перспективная альтернатива традиционным методам дробления и измельчения.

2.2. Вертикальные мельницы

Вертикальные мельницы (Vertimill, VRM – Vertical Roller Mills) являются высокоэффективным оборудованием для тонкого и сверхтонкого измельчения, которое обеспечивает значительную экономию энергии по сравнению с традиционными шаровыми мельницами.

Ключевые преимущества вертикальных мельниц:

- Экономия энергии достигает 35-50% по сравнению с горизонтальными шаровыми мельницами.
- Экономия мелющих тел до 35%.
- Более высокая эффективность измельчения за счёт упорядоченного движения мелющей среды.
- Возможность работы с питанием до 20 мкм и ниже.
- Широкий диапазон установленной мощности – от 11 кВт до 1500 кВт.

Вертикальные мельницы уже получили признание как наиболее энергоэффективное оборудование для измельчения в горной промышленности. Современные разработки, такие как сухие вертикальные валковые мельницы (VRM), позволяют значительно снизить энергопотребление на одном из самых энергоёмких этапов переработки.

2.3. Рекуперация тепла

Рекуперация тепла позволяет использовать тепловую энергию, которая в противном случае теряется в атмосферу или сбрасывается с водой.

Основные источники тепла для рекуперации на горных предприятиях:

- Шахтные воды - могут использоваться для отопления производственных и бытовых помещений, а также для предварительного подогрева воздуха в системах вентиляции. Закрытые геотермальные системы на основе скважин могут обеспечивать стабильную подачу тепла.
- Тепло выхлопных газов газопоршневых электростанций, работающих на шахтном метане.
- Вентиляционные выбросы - тепло отработанного воздуха может улавливаться и использоваться для подогрева свежего воздуха в зимний период.

- Отходящие газы и дымовые газы металлургических и обжиговых печей.

Использование органического цикла Ренкина (ORC) для преобразования низкопотенциального тепла в электроэнергию позволяет повысить общую эффективность выработки энергии на 3,26%. В условиях роста цен на энергоносители и ужесточения экологических требований, рекуперация тепла становится важным направлением повышения энергоэффективности горного производства.

3. Возобновляемые источники энергии для горных предприятий

Горные предприятия, особенно расположенные в удалённых районах, всё чаще рассматривают возможность использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для снижения затрат на энергоснабжение и сокращения углеродного следа.

3.1. Солнечные электростанции (СЭС)

Размещение солнечных панелей на территории горных предприятий имеет ряд преимуществ:

- Использование нарушенных земель – отвалы и хвостохранилища могут быть использованы для размещения СЭС, что позволяет решать задачи рекультивации и генерации энергии одновременно.
- Снижение затрат на электроэнергию – СЭС позволяют сократить закупки электроэнергии из внешних сетей.
- Снижение углеродного следа – замещение традиционной генерации возобновляемой энергией.

Исследования показывают, что использование потенциала альтернативных источников энергии в условиях карьеров и отвалов может дать существенный экономический эффект - до 47,3 млн руб. в год.

3.2. Ветроэлектростанции (ВЭС)

Ветроэнергетика также находит применение на горных предприятиях:

- На карьерах и отвалах формируются условия для концентрации ветровой энергии.
- Ветрогенераторы могут устанавливаться на бортах карьеров и на отвалах.
- Комбинирование СЭС и ВЭС с гидроаккумулирующими системами позволяет обеспечить более стабильное энергоснабжение.

Эффективность использования ВИЭ на горных предприятиях требует научно-методического обоснования параметров размещения оборудования с учётом направления и скорости ветра, а также рельефа местности.

3.3. Интеграция ВИЭ в энергосистему

Важным аспектом является интеграция возобновляемой генерации в общую систему энергоснабжения горного предприятия. Критерием эффективности при обосновании параметров карьеров и отвалов является максимальное использование потенциала альтернативных источников энергии при заданной рентабельности горных работ.

4. Управление выбросами метана при угледобыче

Метан, выделяющийся при добыче угля, является одним из наиболее значительных источников парниковых газов в горной промышленности. Одновременно он представляет собой ценный энергоресурс, который может быть использован для выработки тепловой и электрической энергии.

4.1. Дегазация угольных пластов

Дегазация – это система мероприятий по извлечению метана из угольных пластов и вмещающих пород для снижения метанообильности горных выработок и последующего использования метана.

Методы дегазации:

- Заблаговременная дегазация – извлечение метана до начала очистных работ.
- Текущая дегазация – извлечение метана в процессе ведения горных работ.
- Дегазация выработанного пространства – извлечение метана из обрушенных пород.

Дегазационные системы позволяют не только повысить безопасность горных работ, но и создают сырьевую базу для энергетического использования метана.

4.2. Утилизация метана

Основные направления утилизации шахтного метана:

1. Газопоршневые электростанции – метан используется для выработки электроэнергии и тепла. Получение тепловой и электрической энергии при утилизации дегазационного метана экономически целесообразно.
2. Производство тепла – сжигание метана в котельных для отопления и горячего водоснабжения.
3. Химическая переработка – получение химических продуктов из метана.

Эффективность утилизации:

- Положительный экономический эффект достигается при использовании дополнительных стимулов, включая продажу единиц сокращенных выбросов.
- Объединение утилизации метана и рекуперации тепла выхлопных газов позволяет снизить индекс энергоёмкости когенерации и повысить операционную эффективность.
- При концентрации метана более 25% утилизация становится экономически эффективной.

5. Углеродный налог и углеродные единицы

5.1. Углеродный налог: механизм и влияние

Углеродный налог является одним из основных инструментов климатической политики, направленных на стимулирование сокращения выбросов парниковых газов. Для горнодобывающей промышленности, как одного из крупнейших эмитентов, введение или повышение углеродного налога имеет существенные экономические последствия.

Текущие тенденции:

- В ЮАР ставка углеродного налога выросла с R236 до R308 за тонну CO₂-эквивалента - это крупнейшее единовременное повышение с момента введения налога в 2019 году. К 2030 году ставка достигнет R462 за тонну.

- Сокращение необлагаемых лимитов существенно повышает налоговые обязательства в углеродоёмких отраслях, таких как добыча полезных ископаемых.

- При этом правительство увеличивает лимит компенсации выбросов от сжигания топлива с 10% до 25%, чтобы стимулировать компании инвестировать в одобренные проекты компенсации выбросов.

Влияние на горные проекты:

- Углеродный налог может повысить стоимость добычи угля более чем на 150% от текущей стоимости продукции.

- Для большинства других товаров горнодобывающей промышленности налог составит менее 30% от текущей стоимости.

- Углеродный налог может снизить экспортные доходы стран, специализирующихся на экспорте углеродоёмкой продукции.

5.2. Углеродные единицы и торговля выбросами

Углеродные единицы (carbon credits) представляют собой сертификаты, подтверждающие сокращение выбросов парниковых газов. Для горных предприятий участие в углеродных рынках открывает дополнительные возможности:

- Монетизация сокращений выбросов – продажа углеродных единиц, полученных от внедрения энергоэффективных технологий, утилизации метана, перехода на ВИЭ.

- Компенсация собственных выбросов – покупка углеродных единиц для достижения целей по сокращению углеродного следа.

- Стимулирование инвестиций – углеродные кредиты могут повысить экономическую эффективность проектов по декарбонизации.

В России и Казахстане системы углеродного регулирования находятся на стадии формирования. Углеродный налог может быть включён в платежи за негативное воздействие на окружающую среду.

5.3. Стратегии адаптации горных компаний

Для снижения влияния углеродного налога и использования возможностей углеродных рынков горные компании применяют следующие стратегии:

- Инвестиции в энергоэффективность – снижение энергопотребления и, соответственно, косвенных выбросов.

- Переход на возобновляемые источники энергии – снижение прямых выбросов от сжигания топлива.

- Утилизация метана - превращение парникового газа в энергоресурс.

- Участие в углеродных проектах – получение углеродных единиц для компенсации или продажи.

- Оптимизация логистики – сокращение транспортных выбросов.

6. Примеры реализации

6.1. Переход рудников ВНР на «зелёную» энергию

Компания ВНР, один из крупнейших горнодобывающих концернов мира, реализует масштабную программу декарбонизации, демонстрируя как успехи, так и вызовы энергоперехода в горной отрасли.

Ключевые результаты:

- Глобальные выбросы ВНР сократились на 36% с 2020 года. Основной вклад в это снижение внес переход чилийских медных рудников на возобновляемую энергию.

- В Чили ВНР обеспечивает 100% электроснабжения своих медных рудников из возобновляемых источников.

Вызовы и противоречия:

- Несмотря на глобальный прогресс, по железорудным операциям в Западной Австралии прогнозируется сокращение выбросов лишь на 1% к 2030 году.

- ВНР приостановила утверждённый советом директоров проект по солнечной энергии и аккумуляторным батареям на руднике Jimblebar.

- Отложено строительство системы возобновляемой энергии мощностью 500 МВт.

Этот пример показывает, что даже лидеры отрасли сталкиваются с противоречиями между амбициозными целями декарбонизации и экономическими реалиями, особенно в условиях волатильности рынков.

6.2. Проекты по улавливанию и минерализации CO₂ в хвостохранилищах

Хвостохранилища и отвалы горных пород обладают уникальным потенциалом для естественной и ускоренной секвестрации углекислого газа. Этот подход рассматривается как перспективное направление декарбонизации горной отрасли.

Научные основы: Процесс минерализации CO₂ подразумевает взаимодействие углекислого газа с минералами, содержащими кальций, магний и железо (оливин, серпентин и другие силикаты), с образованием стабильных карбонатных фаз. В результате последовательных реакций растворения и осаждения углекислый газ фиксируется в твёрдой форме.

Практические проекты:

АЛРОСА (Россия)

- Компания реализовала первый в России климатический проект по улавливанию CO₂ (CDR-проект) на хвостохранилище обогатительной фабрики №3 МНГОКа.

- Мощность поглощения достигает 25 тыс. т CO₂-экв. в год.

- Технология основана на способности кимберлитовых пород активно абсорбировать CO₂ на этапах добычи, переработки и складирования в хвостохранилище.

«Норильский никель»

- Компания планирует изучение искусственной и активной минерализации породы хвостохранилищ с 2025 года.

Новосибирский государственный университет

- Учёные оценили потенциал технологии усиленного выветривания горных пород для связывания CO₂.

- Отвалы и хвостохранилища могут стать не только объектом рекультивации, но и инструментом борьбы с изменением климата.

- Долгосрочный потенциал удаления CO₂ может достигать 141 кг на тонну материала.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие технологические процессы являются наиболее энергоёмкими на горных предприятиях? Какова их доля в общем энергопотреблении?

2. В чём сущность высоковольтной электроимпульсной дезинтеграции и каковы её преимущества перед традиционными методами дробления и измельчения?

3. Какие энергосберегающие технологии позволяют снизить энергопотребление при измельчении руды? На сколько процентов вертикальные мельницы экономичнее шаровых?

4. Какие источники тепла могут быть использованы для рекуперации на горных предприятиях? Приведите примеры практической реализации.

5. Как возобновляемые источники энергии (СЭС, ВЭС) могут быть интегрированы в энергоснабжение горных предприятий? Какие преимущества даёт размещение СЭС на отвалах и хвостохранилищах?

6. Каковы основные методы дегазации и утилизации шахтного метана? Почему утилизация метана является экономически выгодной?

7. Как углеродный налог влияет на экономику горных проектов? Какие стратегии адаптации используют горные компании?

8. Какие проекты по улавливанию и минерализации CO₂ в хвостохранилищах реализованы или планируются в мировой практике? Каков их потенциал?

Список использованной литературы

1. Energy efficiency in the minerals industry: best practices and research directions // Springer, 2025.

2. Influence of Electrode Size on the Fragmentation Process of Rocks with Different Heterogeneities under High-Voltage Pulses // Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025.

3. High-Voltage Pulse Fragmentation (HVPF) // HAL Science, 2025.

4. Metso and Loesche unveil VRM dry grinding solution // Australian Mining, 2026.

5. Повышение энергоэффективности получения тепла при утилизации шахтного метана в газопоршневых электростанциях // Уголь, 2024.