

Конспект лекций

Тема 2. Основные технологические процессы и технологические машины горнодобывающих предприятий

Цель изучения темы

Сформировать целостное представление о технологической цепочке горнодобывающего предприятия, назначении основных и вспомогательных процессов, принципах выбора и взаимодействия технологических машин на этапах подготовки месторождения, разрушения массива, выемки, погрузки, транспортирования и переработки минерального сырья.

Планируемые результаты обучения

После изучения темы студент должен:

- различать основные способы разработки месторождений и характерные для них технологические процессы;
- объяснять назначение основных групп горных машин и оборудования;
- понимать связь между свойствами массива, технологической схемой и параметрами оборудования;
- описывать движение руды, пустой породы, воды и энергии по технологической цепочке;
- объяснять, почему производительность предприятия определяется согласованной работой комплекса машин, а не одной наиболее мощной машины;
- учитывать требования безопасности, технического обслуживания, пылеподавления и защиты окружающей среды при анализе технологических процессов.

1. Понятие технологического процесса горного предприятия

Горнодобывающее предприятие представляет собой систему взаимосвязанных процессов, посредством которых полезное ископаемое отделяют от массива, перемещают, при необходимости обогащают и подготавливают к дальнейшему использованию. Типовая производственная цепочка включает горно-капитальные и подготовительные работы, отделение полезного ископаемого от массива, погрузку, транспортирование, рудоподготовку и обогащение. Конкретный состав операций зависит от вида месторождения, физико-механических свойств пород, глубины залегания, способа разработки и требований к конечному продукту [1](#) [2](#).

Технологический процесс — упорядоченная совокупность операций, в ходе которых изменяются положение, состояние, крупность, форма или состав материала. Например, скальная руда может быть пробурена и взорвана, затем экскаватором загружена в автосамосвал, доставлена к дробильному пункту, измельчена и направлена на магнитное или иное обогащение.

Технологическая машина — машина, непосредственно выполняющая операцию горного или перерабатывающего процесса: буровой станок, экскаватор, проходческий или очистной комбайн, карьерный самосвал, конвейер, дробилка, мельница, грохот, сепаратор, насос и др. В состав технологического оборудования входят также установки и комплексы, объединяющие несколько машин и систем управления.

В учебном анализе полезно различать:

- **основные операции**, непосредственно связанные с отделением полезного ископаемого, его погрузкой, транспортированием и подготовкой продукта;

- **вспомогательные операции**, обеспечивающие возможность безопасного и непрерывного производства: крепление выработок, вентиляция, водоотлив, энергоснабжение, связь, ремонт и техническое обслуживание, пылеподавление, контроль состояния массива и управление отходами.

Это разграничение условно в том смысле, что вспомогательная операция не обязательно второстепенна. Например, отсутствие вентиляции в подземной шахте может остановить добычу, хотя вентиляционная установка сама по себе не разрушает и не перемещает руду [1](#).

Обобщённая технологическая схема

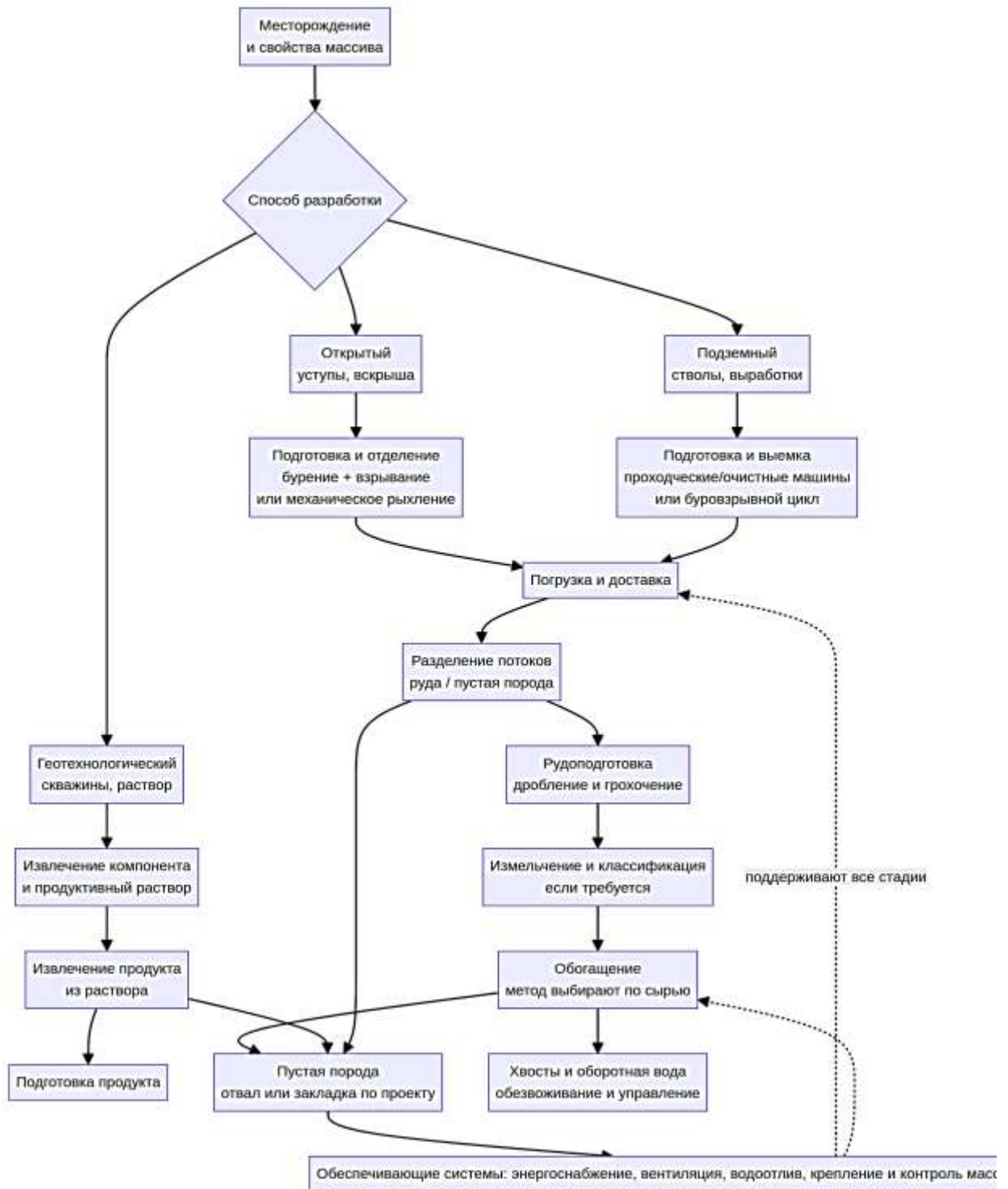


Рисунок 1. Обобщённая схема технологических процессов. В реальном проекте отдельные стадии могут отсутствовать, повторяться или иметь иной порядок. Например, не всякая руда проходит флотацию, а дробление иногда выполняется непосредственно в забое или в подземной выработке.

2. Подготовка месторождения и выбор способа разработки

До начала добычи необходимо обеспечить доступ к месторождению и подготовить рабочие зоны. Состав подготовительных работ определяется способом разработки.

При **открытой разработке** формируют карьер и уступы, создают съезды и транспортные дороги, устраивают площадки для буровых станков, организуют водоотвод и размещение вскрышных пород. При **подземной разработке** проходят стволы, штольни, уклоны и горные выработки, создают камеры и блоки, организуют крепление пород, вентиляцию, водоотлив и подземную транспортную сеть. Выбор способа связан с залеганием рудного тела, глубиной, геометрией месторождения и экономическими и экологическими условиями.

Геотехнологические способы применяются к определённым месторождениям, когда полезный компонент можно извлечь через скважины, растворение, выщелачивание или иной управляемый физико-химический процесс. В таких схемах вместо обычной выемки и перевозки всей горной массы ключевую роль могут играть буровые установки, насосные агрегаты, трубопроводы, системы приготовления реагентов и установки извлечения компонента из продуктивного раствора. Такой способ нельзя считать универсальной заменой карьерной или шахтной добычи: он применим только при соответствующих свойствах месторождения и контролируемых гидрогеологических условиях.

Сравнение основных способов разработки

Признак	Открытая разработка	Подземная разработка	Геотехнологический способ
Доступ к месторождению	Через карьерные выработки и уступы	Через стволы, штольни, уклоны и подземные выработки	Через скважины или специально оборудованные каналы
Характерные процессы	Вскрышные работы, бурение, взрывание или рыхление, экскавация, карьерный транспорт	Проведение выработок, крепление, выемка, доставка из забоя, подъем на поверхность	Бурение, закачка реагента или теплоносителя, циркуляция раствора, извлечение компонента
Типичные машины и установки	Буровые станки, экскаваторы, погрузчики, автосамосвалы, дробильные установки, конвейеры	Проходческие и очистные комбайны, буровые установки, крепь, погрузочно-доставочные машины, вагонетки, конвейеры, подъёмные машины, вентиляторы, насосы	Буровые станки, насосы, трубопроводы, установки подготовки и переработки раствора
Важные обеспечивающие системы	Дорожная сеть, осушение, пылеподавление, диспетчеризация и рекультивация	Вентиляция, крепление, газовый и пылевой контроль, водоотлив, связь и аварийное обеспечение	Контроль давления, герметичности, состава раствора и состояния подземных вод

3. Разрушение и отделение полезного ископаемого от массива

Для последующих операций горную породу необходимо отделить от массива и получить материал подходящей крупности. Способ разрушения выбирают с учётом крепости, трещиноватости, вязкости, влажности пород, требуемой производительности и технологии добычи.

3.1. Бурение и взрывная подготовка

При разработке крепких скальных пород часто применяют буровзрывной способ. Сначала буровым станком формируют скважины по заданной схеме. Затем скважины заряжают взрывчатым веществом, выполняют взрывание с установленными защитными и организационными мерами и после проверки рабочей зоны подают оборудование для погрузки. При разработке железных руд карьерные буровые станки, в том числе станки шарошечного бурения, используют для создания скважин под взрывные заряды [2](#).

Буровой станок в общем случае состоит из ходовой базы или опорной платформы, мачты, механизма подачи, вращателя или ударного механизма, бурового става с рабочим инструментом и систем обеспечения. Важные параметры выбора — диапазон диаметров и глубин бурения, усилие подачи, скорость проходки, устойчивость машины, тип привода и соответствие свойствам массива. Не следует оценивать станок только по максимальному диаметру скважины: значение имеют также точность расположения скважин, качество бурения и согласование с параметрами последующего взрывания.

Технологический смысл буровзрывной подготовки состоит не только в разрушении массива, но и в получении приемлемого гранулометрического состава. Слишком крупные куски могут затруднять погрузку и требовать вторичного дробления; чрезмерное измельчение увеличивает образование мелочи и пыли и может ухудшать последующую переработку.

3.2. Механическое разрушение

В породах, которые возможно разрабатывать непосредственно режущим или исполнительным органом, используют комбайновую выемку, фрезерование, рыхление зубьями или резцами. Механическое разрушение распространено, в частности, при добыче некоторых угольных, соляных и других пластовых месторождений. Оно может уменьшить или исключить необходимость взрывного цикла, однако его эффективность зависит от крепости породы, абразивности, трещиноватости и износа инструмента [1](#).

В подземной угольной добыче проходческий комбайн непрерывного действия режущей коронкой отделяет уголь и передаёт его внутренним собирающим устройством на цепной конвейер, а затем на транспортную машину. Работа комбайна связана с необходимостью поддерживать вентиляцию забоя и своевременно устанавливать крепь кровли; интегрированные машины «комбайн-крепитель» позволяют выполнять часть операций параллельно [3](#). Это наглядно показывает, что производительность выемочной машины определяется не только скоростью резания, но и возможностями транспортной системы и безопасной организацией рабочего пространства.

3.3. Основные группы машин для подготовки и выемки

Технологическая операция	Основные машины и оборудование	Назначение и характерные показатели
Бурение	Карьерные, подземные, проходческие и буровые станки; буровые установки	Создание шпуров и скважин; диаметр, глубина, скорость бурения, точность позиционирования

Технологическая операция	Основные машины и оборудование	Назначение и характерные показатели
Взрывная подготовка	Зарядные машины, системы инициирования и контроля взрыва	Размещение зарядов и управление взрывной подготовкой; работы ведутся по утверждённой технологической документации и правилам безопасности
Механическая выемка	Проходческие и очистные комбайны, механические рыхлители, фрезерные машины	Отделение материала режущим или разрушающим органом; производительность, мощность, ширина захвата, устойчивость к износу
Погрузка	Одноковшовые экскаваторы, фронтальные погрузчики, погрузочно-доставочные машины	Зачерпывание материала и его загрузка в транспорт или перегрузочное устройство; вместимость ковша, усилие, цикл, высота разгрузки
Крепление	Анкероустановщики, механизированная крепь, крепеукладчики	Поддержание устойчивости кровли и бортов выработки; допустимая нагрузка, быстрота установки и соответствие геомеханическим условиям

4. Погрузка, транспортирование и выдача горной массы

После отделения от массива руда и пустая порода должны быть загружены, доставлены к месту разгрузки и направлены по назначению. Потоки руды и вскрышных пород обычно различают: руда поступает на дробление, склад или фабрику; пустая порода — в отвал, на закладку или иной предусмотренный объект. Конкретное решение зависит от проекта и характеристик материала [2](#).

4.1. Погрузочные машины

Погрузка может осуществляться экскаватором, фронтальным погрузчиком, погрузчиком непрерывного действия, шахтной погрузочной машиной или погрузочно-доставочной машиной. Выбор зависит от крупности и свойств материала, размеров рабочего пространства, требуемой производительности и выбранного вида транспорта.

Для оценки взаимодействия погрузчика и транспортной машины важно сопоставлять вместимость ковша и кузова, длительность цикла погрузки, условия маневрирования, расстояние до разгрузки и возможное ожидание машин. Если транспорт не успевает подвозить порожние машины, погрузчик простаивает; если погрузочная машина не обеспечивает загрузку требуемого количества самосвалов, транспортный парк недоиспользуется.

4.2. Транспортные системы

К основным видам транспорта относятся:

- **автомобильный транспорт** — карьерные самосвалы и шахтные машины; обеспечивает гибкость маршрутов, но требует дорог, разворотных площадок и организации движения;
- **железнодорожный транспорт** — локомотивы и думпкары; целесообразен на устойчивых маршрутах с большими потоками;
- **конвейерный транспорт** — ленточные, скребковые и другие конвейеры; особенно эффективен при достаточно непрерывном потоке и стационарной либо поэтапно перемещаемой трассе;

- **рельсовый и самоходный подземный транспорт** — вагонетки, электровозы, самоходные самосвалы и погрузочно-доставочные машины;
- **гидравлический или пневматический транспорт** — перемещение измельчённого материала в потоке жидкости или газа в тех схемах, где такой способ допустим технологически.

Транспортная схема должна учитывать производительность забоев, дробильных пунктов и фабрики, длину и профиль маршрутов, высоту подъёма, условия движения, затраты энергии и возможность резервирования оборудования. В непрерывной последовательной цепи ограничивающим звеном становится операция с наименьшей фактической пропускной способностью. Поэтому увеличение мощности одной машины не гарантирует роста выпуска, если соседняя стадия не способна принять дополнительный поток.

4.3. Перегрузка и дробление в процессе транспортирования

В некоторых схемах крупнокусковой материал предварительно дробят прямо в карьере или под землёй. Стационарные, полустационарные и мобильные дробильные установки позволяют изменить маршрут материала и снизить нагрузку на часть транспортной системы. В подземной угольной цепочке комбайн может подавать материал на собственный конвейер, а затем на перегружатель или магистральный конвейер [3](#).

5. Переработка минерального сырья

На обогатительную фабрику поступает руда, которую требуется подготовить и, если необходимо, разделить на полезную составляющую и пустую породу. Цель **обогащения** — повысить содержание ценного минерала или компонента в продукте, используя различия в физических, физико-химических или химических свойствах частиц. Маршрут выбирают для конкретного сырья; единой схемы обогащения для всех руд не существует.

5.1. Рудоподготовка

Дробление уменьшает размеры кусков. Для этого используют щековые, конусные, валковые и другие типы дробилок. **Грохочение** разделяет материал по крупности с помощью ситовых поверхностей. Крупные фракции могут возвращаться на дробление, а материал требуемой крупности поступает дальше.

Измельчение уменьшает частицы до размеров, при которых полезный минерал в достаточной мере освобождается от вмещающей породы. В качестве оборудования применяются барабанные мельницы, стержневые или шаровые мельницы, мельницы самоизмельчения и другие конструкции. Излишнее измельчение повышает расход энергии и может усложнить разделение. Поэтому режимы измельчения связывают с крупностью питания и технологическими требованиями к продукту.

Классификация разделяет измельчённую пульпу по размеру или скорости осаждения частиц. Для неё применяются гидроциклоны, спиральные классификаторы и другие аппараты. Крупная фракция часто возвращается на доизмельчение, а более тонкая направляется на обогащение.

5.2. Основные методы обогащения

Метод	Используемое различие между частицами	Типичное оборудование	Пример применения
Гравитационный	Различие плотности и скорости перемещения частиц в среде	Отсадочные машины, концентрационные столы, спиральные сепараторы	Разделение минералов разной плотности

Метод	Используемое различие между частицами	Типичное оборудование	Пример применения
Магнитный	Различие магнитных свойств	Барабанные и валковые магнитные сепараторы	Отделение магнитных минералов, например ряда железных руд
Флотационный	Различие поверхностных свойств частиц и их взаимодействия с пузырьками воздуха	Флотационные машины и колонны, системы подачи воздуха и реагентов	Разделение минеральных частиц в водной пульпе
Электрический	Различия электрических свойств частиц	Электростатические сепараторы	Разделение некоторых сухих минеральных смесей
Гидрометаллургический	Избирательное растворение компонента и его последующее извлечение из раствора	Реакторы, насосы, фильтры, сорбционные или экстракционные аппараты	Извлечение компонента из руды или раствора по специальной схеме

Для железорудного сырья в зависимости от его состава могут применяться дробление, измельчение, классификация, магнитная сепарация или флотация, а затем сгущение и фильтрование [2](#). Этот перечень не следует трактовать как обязательную последовательность для любого рудника: выбранную схему устанавливают по результатам изучения сырья и технологических испытаний.

5.3. Обезвоживание и обращение с продуктами

После обогащения концентрат часто требуется обезводить. Для этого применяют сгустители, фильтры и сушильные установки, если сушка необходима. Вода может возвращаться в технологический цикл после соответствующей подготовки. Хвосты обогащения направляют на предусмотренное проектом хранение или дальнейшее использование. Сгущение, фильтрование и управление оборотной водой описаны как отдельные стадии в отраслевой схеме добычи и обогащения железных руд [2](#).

Хвосты, отвалы, пылевые выбросы и загрязнённые воды требуют инженерного контроля. Технологическая машина должна рассматриваться не изолированно, а в контексте мест её установки, режима работы, источников пыли, потребления воды и энергии. Руководство NIOSH рассматривает меры инженерного контроля пыли на этапах бурения, дробления, грохочения, конвейерного транспортирования, погрузки и перевозки минералов [4](#).

6. Вспомогательные технологические системы

Основная цепочка добычи не может работать без комплекса обеспечивающих систем.

6.1. Проветривание и газовый контроль

В подземных шахтах вентиляционные установки и сеть выработок обеспечивают подачу воздуха и удаление тепла, пыли и опасных газов. По мере продвижения забоя вентиляционную сеть приходится изменять: например, продлевать вентиляционные трубы или переносить оборудование. В угольной выработке вентиляция тесно связана с допустимой скоростью продвижения проходческого комбайна и обеспечением безопасности [3](#).

6.2. Водоотлив и водоснабжение

Водоотливные насосы, водосборники, трубопроводы и дренажные системы удаляют воду из рабочих зон. Вода также нужна для охлаждения, пылеподавления и приготовления

технологической пульпы. Избыток влаги, абразивные частицы и коррозионная среда влияют на выбор насосов, уплотнений и материалов оборудования.

6.3. Энергоснабжение и электромеханическое оборудование

Электродвигатели, трансформаторные подстанции, кабельные сети, распределительные устройства и преобразователи частоты обеспечивают работу стационарных и мобильных машин. При выборе схемы учитываются пусковые режимы, удалённость оборудования, условия эксплуатации, защита от перегрузок и требования к исполнению оборудования в соответствующей среде.

6.4. Ремонт, техническое обслуживание и контроль состояния

Система технического обслуживания включает осмотры, смазку, регулировку, замену изнашиваемых деталей, диагностику и планирование ремонта. Для оборудования, критичного для общей производительности, важны не только паспортная мощность, но и техническая готовность, время восстановления и наличие резервных узлов. Чем более взаимозависима технологическая цепь, тем сильнее простой одной ключевой машины влияет на общий выпуск [1](#).

6.5. Пылеподавление и производственная гигиена

Пыль возникает при бурении, взрывании, погрузке, перегрузке, дроблении и транспортировании. К инженерным мерам относят укрытия, аспирацию, орошение, локальную вентиляцию и удаление пыли, если они подходят конкретному процессу. Пылевой контроль является частью конструкции и эксплуатации машин и технологических пунктов, а не только индивидуальной защитой работника [4](#).

7. Согласование технологических машин в единый комплекс

Эффективность горного предприятия определяется согласованностью машин по производительности, доступности, режиму работы и пропускной способности связующих операций. Если экскаватор может грузить материал быстрее, чем его вывозит автопарк, возникают очереди и простои. Если дробильный пункт не принимает подачу из забоя, заполнение транспортной системы не повышает выпуск. В учебном материале Penn State подчёркивается, что даже задержка одной машины в цикле может задержать другие машины на участке [1](#).

При анализе технологического комплекса целесообразно пройти последовательные этапы:

- 1 определить целевой объём добычи и свойства сырья;
- 2 описать маршрут материала от забоя до склада, дробильной установки или фабрики;
- 3 перечислить операции и машины на каждой стадии;
- 4 сопоставить фактическую производительность смежного оборудования и выявить потенциально ограничивающее звено;
- 5 учесть плановые и внеплановые простои, техническое обслуживание, транспортные задержки и резервирование;
- 6 проверить, какие вспомогательные системы обязательны для безопасной работы выбранной схемы;
- 7 оценить воздействие пыли, шума, воды, энергии и отходов.

Основные показатели для характеристики машин и цепочки

Показатель	Содержание
Производительность	Количество материала, которое машина или участок обрабатывает за единицу времени
Вместимость	Объём ковша, кузова, бункера, камеры, ёмкости или транспортного средства
Техническая готовность	Способность машины быть исправной и доступной для выполнения производственной задачи
Надёжность	Способность сохранять работоспособность в заданных условиях в течение определённого времени
Энергоёмкость	Количество энергии, необходимое для выполнения единицы производственной работы или обработки материала
Крупность продукта	Размерный состав материала после выемки, дробления или измельчения
Коэффициент использования времени	Доля времени смены или периода, когда оборудование выполняет полезную работу
Пропускная способность системы	Количество материала, которое вся последовательность операций может принять и передать за единицу времени

Для последовательной цепи полезно использовать простое правило: **увеличение мощности отдельной машины повышает общий выпуск только тогда, когда дальнейшие операции способны принять дополнительный материал**. Например, увеличение вместимости самосвала может увеличить массу одной перевозки, но одновременно потребовать усиления погрузчика, дорожной инфраструктуры и узлов разгрузки.

8. Современные тенденции развития процессов и оборудования

8.1. Комплексная механизация и непрерывные технологии

Механизация объединяет отдельные операции в согласованный комплекс: бурение, разрушение, погрузку, транспортирование и вспомогательные функции. Непрерывные технологии стремятся уменьшить ожидание между стадиями и сократить количество цикловых перегрузок. Примером служит комбайновая выемка, при которой резание и первичная передача материала совмещены в одной машине [3](#). Однако непрерывность требует надёжной транспортной цепи, синхронизации производительности и своевременного ремонта.

8.2. Автоматизация, дистанционное управление и автономные машины

Автоматизация применяется к буровым станкам, транспортным системам, дробильно-сортировочным комплексам и диспетчеризации парка. Дистанционное управление позволяет вынести оператора из опасной зоны, а автономные системы способны выполнять определённые циклы без постоянного ручного управления. Обзор исследований по

автоматизации горного оборудования рассматривает её применение и подчёркивает, что распространение таких решений ограничивают стоимость внедрения, требования к инфраструктуре, подготовке специалистов, интеграции рабочих процессов и условиям связи, особенно под землёй [5](#).

Автоматизация не устраняет потребность в инженерере-механике. Напротив, она усиливает значение диагностики, анализа отказов, настройки приводов, понимания датчиков и актуальных процедур безопасного вмешательства в работу комплекса.

8.3. Цифровой мониторинг и техническое обслуживание по состоянию

Датчики температуры, вибрации, давления, скорости и нагрузки могут передавать сведения о работе оборудования в систему мониторинга. Сравнение измерений с допустимыми диапазонами помогает обнаружить ухудшение состояния раньше, чем возникнет полный отказ. При этом датчик не заменяет техническое заключение: специалисту нужно установить, корректно ли измерение, какой узел является источником отклонения и какие действия допустимы.

8.4. Энергоэффективность и электрификация

Энергоэффективность повышают подбором мощности под рабочий режим, устранением холостых перемещений и простоев, использованием частотно-регулируемых приводов и оптимизацией транспортных маршрутов. Для подземных машин электрификация может уменьшить локальные выхлопы и изменить требования к вентиляции, но требует продуманной инфраструктуры электроснабжения или зарядки и адаптации ремонтного обслуживания. Выбор решения оценивают для конкретного предприятия, а не по одному показателю.

8.5. Управление жизненным циклом и ремонтпригодность

При проектировании и закупке оборудования оценивают не только производительность и начальную стоимость. Важны срок службы, ремонтпригодность, доступность запасных частей, совместимость с существующей транспортной схемой, расход энергии и воды, возможность диагностики и порядок безопасного обслуживания. Чем сложнее электронная и автоматизированная часть, тем важнее компетенции персонала на стыке механики, электротехники, автоматизации и анализа данных.

9. Пример комплексной технологической цепочки открытого рудника

Рассмотрим условное железорудное месторождение со скальными породами.

- 8 Подготавливают уступ и площадки для бурения. Бульдозеры и автогрейдеры поддерживают рабочую площадку и дороги.
- 9 Буровые станки создают скважины по принятой схеме. Затем выполняют взрывную подготовку массива согласно утверждённому проекту производства работ.
- 10 После проверки безопасности экскаватор загружает взорванную горную массу в автосамосвалы. Руду доставляют к дробильному пункту или складу; вскрышную породу направляют в отвал либо на иной предусмотренный объект.
- 11 Руду дробят и при необходимости грохотят. Размерный состав приводят к требованиям последующих операций.
- 12 В зависимости от минерального состава руду измельчают и направляют на подходящий метод обогащения, например магнитную сепарацию или флотацию.
- 13 Концентрат обезвоживают и отправляют на дальнейшую переработку или отгрузку. Воду по схеме предприятия возвращают в технологический цикл; хвосты направляют на предусмотренное хранение.

14 На всех этапах работают обеспечивающие системы: энергоснабжение, водоотлив, пылеподавление, ремонт, контроль состояния техники и диспетчеризация.

Эта схема показывает, почему технологический инженер должен учитывать всю цепочку: параметр бурения влияет на крупность взорванной породы, она — на экскавацию и загрузку, а те — на работу транспорта и дробилки. Ошибка или несогласованность на ранней операции способна увеличить нагрузку или простои на последующих стадиях.