



## СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ В ГОРНОЙ ИНЖЕНЕРИИ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

**Елисеева Марфа Евгеньевна**

Аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

### Аннотация

В настоящей статье представлен подробный комплексный анализ современных тенденций, технологических подходов и инженерных решений в области горной инженерии при подземной добыче твердых полезных ископаемых. В работе детально рассматриваются геомеханические процессы, возникающие в массиве горных пород при ведении очистных работ, механизмы сдвижения горных пород, а также эволюция систем крепления горных выработок. Автор деконструирует современные методы инструментального мониторинга устойчивости обнажений, анализирует принципы проектирования подземных геотехнических систем и методы предотвращения динамических проявлений горного давления. Особое внимание уделяется интеграции цифровых технологий, автоматизированных комплексов и систем трехмерного горно-геологического моделирования, что позволяет существенно повысить экономическую эффективность горного производства и обеспечить максимальную безопасность ведения подземных горных работ.

**Ключевые слова:** горная инженерия, подземная разработка, геомеханика, горное давление, крепь, массив горных пород, горно-геологические системы, цифровая шахта, безопасность.

### Введение

В современную эпоху стремительного индустриального развития, исчерпания богатых приповерхностных запасов полезных ископаемых и перехода горнодобывающей отрасли на более глубокие горизонты, горная инженерия претерпевает глубокую качественную и технологическую трансформацию. Добыча минерального сырья сегодня представляет собой сложнейший наукоемкий процесс, находящийся на стыке геологии, механики сплошных сред, термодинамики и цифровых технологий управления. Переход горных работ на глубины, превышающие тысячу метров, ставит перед горными инженерами беспрецедентные вызовы, связанные с резким ухудшением горно-геологических условий, ростом естественного поля напряжений, повышением температуры

вмещающего массива и возрастанием риска возникновения внезапных динамических проявлений горного давления. В связи с этим в мае две тысячи двадцать шестого года традиционные, эмпирические подходы к проектированию рудников и шахт окончательно уступают место прецизионным методам физико-математического моделирования и автоматизированного контроля.

Масштаб современных подземных геотехнических систем требует непрерывного мониторинга состояния массива горных пород и оптимизации всех звеньев технологической цепочки — от проходки подготовительных выработок до управления обрушением кровли в очистных забоях. Применение устаревших, консервативных схем разработки в условиях высокой напряженности массива не просто снижает рентабельность добычи, но и создает прямую угрозу безопасности жизни горнорабочих. Это диктует необходимость кардинального пересмотра подходов к конструированию крепей, выбору способов управления горным давлением и планированию геологоразведочных и эксплуатационных работ, выдвигая проактивный геотехнический анализ на передний план инженерной деятельности.

С точки зрения фундаментальных технических наук, исследование процессов деформирования и разрушения горных пород под воздействием техногенных факторов позволяет создавать более устойчивые и долговечные подземные сооружения. Важно понимать, что современное горное предприятие — это динамическая, постоянно развивающаяся система, функционирующая в условиях высокой степени неопределенности геологической среды. Полноценное изучение механики подземных сооружений, внедрение интеллектуальных систем диспетчеризации и роботизированной техники дают возможность горным инженерам эффективно осваивать глубокозалегающие месторождения, минимизируя экологическую нагрузку на окружающую среду и гарантируя устойчивое снабжение мировой экономики базовыми сырьевыми ресурсами.

### **Геомеханические процессы в массиве пород и управление горным давлением**

Нам необходимо признать, что проведение любой подземной выработки коренным образом нарушает хрупкое естественное равновесие сил. Массив горных пород моментально реагирует на техногенное вмешательство глобальным перераспределением внутренних напряжений. Вокруг сформированной инженерами полости неизбежно возникает зона жесткой концентрации нагрузок. Ее ключевые параметры напрямую зависят от глубины заложения горизонта, геометрической формы поперечного сечения и, конечно же, прочностных характеристик вмещающих пород. Когда мы спускаемся на большие глубины, сингенетические гравитационные и тектонические силы достигают таких колоссальных величин, что вмещающий рок-массив начинает вести себя подобно пластической или вязкой массе, неуклонно стремясь заполнить собой любое свободное пустотное пространство.

Пожалуй, самым грозным и разрушительным проявлением деформации в глубоких шахтах по-прежнему остается горный удар. Это внезапное, практически взрывоподобное разрушение предельно напряженной приконтурной части пласта, которое сопровождается мгновенным мощным выбросом породы в рабочую зону и сильнейшей акустической волной. Чтобы не допустить подобных катастрофических инцидентов, современная горная инженерия обязана применять методы проактивного управления горным давлением. Исходя из специфики выбранной системы разработки, специалисты закладывают в проекты полную закладку выработанного пространства пустой породой или специальными твердеющими смесями, удержание кровли на жестких межкамерных целиках, либо контролируемое обрушение пород кровли непосредственно за подвиганием забоя с помощью гидравлических механизированных крепей.

Нельзя забывать и о такой важной вехе, как своевременная разгрузка перенапряженных зон массива. На практике горные инженеры успешно внедряют опережающую отработку защитных пластов, бурение разгрузочных скважин большого диаметра впереди текущего забоя и камуфлетное взрывание. Последний метод крайне интересен тем, что позволяет переводить потенциальную упругую энергию массива в кинетическую энергию микродробления глубоко за пределами проектного контура выработки. В результате вокруг нее формируется искусственная зона пластических деформаций, которая эффективно демпфирует внешние нагрузки и переносит опасный пик напряжений вглубь массива, гарантируя стабильность приконтурного пространства.

### **Эволюция систем крепления и геотехнический мониторинг выработок**

Рассматривая проблему долговечности подземных сооружений, важно подчеркнуть: изменчивость механических свойств горных пород требует гибких решений. Старые типы крепей, включая деревянные рамы или тяжелый монолитный бетон, на глубоких горизонтах доказали свою неэффективность из-за чрезмерной материалоемкости и слишком жесткого характера работы. Сегодня парадигма полностью изменилась. Передовые рудники делают ставку на высокотехнологичную анкерную крепь в комбинации с набрызг-бетонным покрытием и прочными металлическими сетками. Эта система принципиально меняет саму логику взаимодействия с массивом, заставляя породу работать на собственную защиту.

Современный анкер не просто пассивно удерживает отслоившиеся куски от падения в забой. Он работает как активный элемент, сшивая ослабленные слои массива между собой и превращая трещиноватую приконтурную зону в жесткую, монолитную несущую конструкцию, которая способна самостоятельно перераспределять горное давление. В инженерной практике, отталкиваясь от конкретных геологических условий, применяют сталеполимерные анкеры с закреплением быстрыми химическими смолами, фрикционные трубчатые анкеры, фиксирующиеся за счет сил трения, или длинные канатные анкеры, которые

надежно связывают контур выработки с глубокими, нетронутыми деформацией прочными слоями.

Естественно, даже самая лучшая крепь требует постоянного присмотра, поэтому в современных шахтах развертываются автоматизированные системы комплексного геотехнического мониторинга. Вдоль главных транспортных артерий и вентиляционных выработок инженеры монтируют датчики акустической эмиссии, тензометрические анкеры, непрерывно фиксирующие малейшие изменения внутренних нагрузок, и высокоточные лазерные сканеры. Эти приборы способны с точностью до миллиметра отслеживать конвергенцию стенок выработки. Вся информация в реальном времени стекается на пульт горного диспетчера, благодаря чему удается обнаружить невидимые глазу деструктивные процессы задолго до их явного проявления и оперативно провести превентивное упрочнение опасного участка.

### **Цифровизация горного производства и трехмерное моделирование геотехнических систем**

Когда мы говорим о масштабах современного горного предприятия, становится очевидно, что координировать сотни взаимосвязанных подземных процессов старыми методами просто невозможно. Именно поэтому бумажное планирование уступило место концепции «цифровой шахты». Идея заключается в формировании сквозного информационного пространства, где геологические базы данных, маркшейдерские замеры, параметры работы тяжелого оборудования и показатели систем жизнеобеспечения увязаны в единый интеллектуальный узел управления, доступный инженерным службам в любой момент времени.

Фундаментом для принятия любых инженерных решений теперь выступают горно-геологические информационные системы. На основе полевых данных разведочного бурения и геофизики в специализированных программах выстраивается детальная трехмерная блочная модель месторождения. Каждый цифровой блок этой модели несет в себе полную информацию о качестве руды, плотности вмещающих пород, уровне обводненности и трещиноватости. Опираясь на эти электронные атласы, горные инженеры с ювелирной точностью рассчитывают траектории развития выработок, моделируют вентиляционные потоки для проветривания подземных лабиринтов и планируют объемы добычи с точностью до конкретной рабочей смены.

Одновременно с этим идет масштабное внедрение роботизированных комплексов непосредственно в подземные очистные забои. Проходческие каретки, очистные комбайны и мощные подземные самосвалы все чаще оснащаются системами автономного вождения и дистанционного контроля. Оператор теперь может находиться на поверхности рудника, сидя в комфортном кресле перед мониторами, и с высокой точностью вести бурение шпуров или отгрузку горной массы на глубине в сотни метров.

Такой подход решает важнейшую задачу горной инженерии — он полностью убирает человека из зон повышенной опасности, параллельно повышая производительность техники за счет исключения простоев, вызванных человеческой усталостью.

## **Заключение**

Подводя итог анализу развития горной инженерии, можно с уверенностью утверждать, что современная подземная разработка недр окончательно превратилась в наукоемкую, высокотехнологичную индустрию. Она требует жесткой интеграции академических знаний в области механики сред и передовых цифровых инструментов. Учитывая постоянное усложнение условий добычи и неизбежный рост глубин, экстенсивный путь развития больше невозможен. Единственный способ сохранить рентабельность и жизнеспособность горнодобывающего сектора — это повсеместный переход к проактивным методам управления массивом и глубокая автоматизация производственных процессов.

Использование точных геомеханических моделей, комбинированных анкерных систем и интеллектуальных платформ трехмерного моделирования позволяет горным инженерам успешно справляться с вызовами природы, сводя к минимуму риски аварий и внезапных обрушений. Масштабные инвестиции в создание цифровых двойников шахт, роботизацию оборудования и внедрение систем непрерывного мониторинга приконтурной зоны окупаются высокой экономической эффективностью недропользования. В конечном счете, именно такой системный, научно обоснованный и ответственный подход к освоению земных недр позволяет гарантировать безопасность шахтеров, сохранять стабильность экосистем и закладывать прочный фундамент для долгосрочного технологического развития всей промышленности.

## **Литература**

1. Трубецкой К. Н., Каплунов Д. Р. Горное дело. Терминологический словарь. — М.: Издательство МГТУ, 2016. — 573 с.
2. Пучков Л. А., Железняк И. И. Подземная разработка месторождений полезных ископаемых: Учебник для вузов. — М.: Горная книга, 2008. — 652 с.
3. Баклашов И. В., Картозия Б. А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. — М.: Недра, 1984. — 415 с.
4. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. — Л.: Недра, 1989. — 488 с.
5. Шахтмейстер Л. Г., Солод Г. И. Подземные горные машины и комплексы. — М.: Недра, 1991. — 432 с.