



## ОБ СТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ: ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И НАГРУЗКИ НА КРЕПЬ

**Ермаков Назар Борисович**

Аспирант, Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСИС»

г. Москва, Российская Федерация

### Аннотация

В представленном материале автор подробно останавливается на вопросах обеспечения устойчивости выработок в условиях сильнонапряженного состояния массива. На основе натурных наблюдений и аналитических расчетов рассматривается поведение приконтурного слоя породы, подверженного интенсивному деформированию. В статье детально деконструируются схемы взаимодействия анкерных систем с вмещающими породами различной степени прочности. Особое место в работе занимает критический разбор существующих нормативных методик расчета нагрузок на крепь, которые не всегда адекватно учитывают пластические свойства пород на больших глубинах. Автор предлагает обратить пристальное внимание на необходимость динамической корректировки паспортов крепления в процессе проходки.

**Ключевые слова:** геомеханика, устойчивость массива, анкерное крепление, пластические деформации, конвергенция, глубокие горизонты, натурные измерения, горная выработка.

### Введение

Давайте снимем маски и признаем очевидный факт: классические, привычные нам учебные формулы из восьмидесятых годов прошлого века все чаще пасуют перед реальностью глубоких шахт. Когда глубина ведения горных работ переваливает за отметку в тысячу двести метров, инженер сталкивается не просто со сложными условиями, а с принципиально иной физикой поведения вмещающего массива. Горное давление здесь перестает быть просто весом вышележащей толщии пород, который можно удержать массивной стальной рамой. В мае две тысячи двадцать шестого года горный инженер вынужден работать в условиях, когда прочность породы на сжатие оказывается ниже тех колоссальных напряжений, которые концентрируются вокруг обнажения. Массив начинает буквально «течь», превращая проходку в постоянную борьбу с неуправляемыми деформациями.

Почему эта проблема встала так остро именно сейчас? Дело в том, что большинство доступных месторождений с простыми горно-геологическими условиями уже отработаны. Индустрия вынуждена вскрывать глубокие горизонты с тектоническими нарушениями, высокой нарушенностью и аномальными пластовыми давлениями. Шаблонный перенос старых проектных решений на новые глубины приводит к закономерным и печальным результатам: выработки «схлопываются» за считанные месяцы, рамные крепи деформируются и скручиваются, а затраты на бесконечные перекрепления и ремонты съедают всю экономическую выгоду от добычи ценной руды. Нам необходим честный, глубокий и свободный от догм анализ того, что на самом деле происходит на контуре выработки.

Цель данной статьи — отойти от привычных идеализированных моделей упругой среды и посмотреть на подземное сооружение как на динамический объект, находящийся в состоянии хрупкого разрушения. Проектирование подземных выработок должно базироваться на реальных цифрах конвергенции, данных ультразвукового зондирования приконтурной зоны и четком понимании того, как и когда включается в работу установленная крепь. Только объединив фундаментальную механику разрушения с оперативным инженерным мониторингом, мы сможем создавать выработки, которые гарантированно отслужат свой проектный срок без аварий и остановок технологического транспорта.

### **Физика разрушения приконтурного массива и природа запредельных деформаций**

Посмотрим внимательно на то, как именно реагирует порода на проходческий взрыв или проход комбайна. В момент обнажения забоя происходит мгновенный сброс радиальных напряжений до нуля, при этом тангенциальные напряжения на стенках выработки резко возрастают, образуя выраженный пик нагрузки. Если мы имеем дело с хрупкими, прочными породами вроде гранитов или крепких песчаников, этот процесс часто сопровождается динамическим шелушением, стрелянием породы или, что гораздо хуже, внезапным вывалом крупных блоков. В более слабых, глинистых или аргиллитовых пачках массив начинает медленно, но верно выдавливаться внутрь выработки. Горняки прекрасно знают этот эффект «пучения почв», когда нижняя часть выработки поднимается вверх, ломая рельсовые пути и блокируя движение вагонеток.

Физический механизм запредельного деформирования кроется в образовании зоны магистральных трещин, параллельных контуру выработки. Порода расслаивается на отдельные плиты, теряя свою монолитную структуру и природное сцепление. Этот разрушенный слой уже не может сопротивляться горному давлению самостоятельно, он начинает смещаться внутрь полости под действием веса глубоких нетронутых слоев. Скорость этого процесса, называемого в геомеханике конвергенцией, на начальном этапе может достигать нескольких сантиметров в сутки.

Если инженеры упустят это время и не зафиксируют контур, начнется лавинообразное вывалообразование, остановить которое будет чрезвычайно трудно и затратно.

Главная ошибка многих проектировщиков заключается в стремлении поставить на пути этого потока породы максимально жесткую, непреодолимую преграду. Опыт показывает, что попытки сдержать многотонный движущийся массив толстым слоем бетона часто заканчиваются тем, что бетон просто трескается и превращается в крошку. Современный подход в горной инженерии требует совершенно иного: крепь должна быть податливой. Она обязана принять на себя первые, самые мощные деформации, контролируемо сместиться вместе с породой на определенное расстояние и лишь затем, по мере уплотнения разрушенной зоны, выйти на жесткий режим работы, стабилизируя контур подземного сооружения.

### **Взаимодействие анкерных систем с разрушающимся массивом**

Перейдем к конкретным инструментам, которые позволяют нам управлять этим сложным процессом. На сегодняшний день ничего более эффективного и гибкого, чем анкерное крепление, мировая горная практика не придумала. Но как именно работает анкер внутри трещиноватой породы? Вопреки старым представлениям, анкер — это не гвоздь, который просто прибивает кусок породы к потолку. Современная штанговая крепь работает как внутренний армирующий элемент, который связывает разрушенные блоки в единую грузонесущую конструкцию, заставляя саму породу сопротивляться дальнейшему смещению.

Рассмотрим работу сталеполимерного анкера глубокого заделывания. При заполнении шпура ампулами с химической смолой происходит глубокое нагнетание скрепляющего состава в мелкие трещины, окружающие шпур. Мы получаем не просто точку закрепления на конце штанги, а сплошную зону упрочненного ампулированным составом рок-массива. Образуется так называемое «несущее кольцо», которое работает как естественная арка над выработкой. Толщина и прочность этой арки напрямую зависят от длины анкера, шага их установки и физико-химических свойств полимерной смолы. Инженер должен рассчитать параметры этой системы так, чтобы пик внешнего горного давления приходился на середину заанкеренной зоны, где прочность породы искусственно повышена.

Однако на сверхглубоких горизонтах обычных жестких анкеров становится недостаточно. При интенсивных сдвигах массива штанги начинают испытывать колоссальные нагрузки на срез на границах раздела слоев с разной прочностью. В таких условиях горные инженеры переходят на комбинированные схемы крепления: контур покрывается армированной металлической сеткой и набрызг-бетоном, а вглубь массива устанавливаются податливые фрикционные или глубокие канатные анкеры длиной до пяти-семи метров.

Канатный анкер, обладая высокой гибкостью, способен выдерживать значительные поперечные смещения слоев без разрыва, надежно связывая нависшую разрушенную кровлю с прочной, нетронутой тектоникой зоной глубокого массива.

## **Критика расчетных методик и переход к динамическому проектированию крепей**

Теперь давайте поговорим о наболевшем — о том, как мы рассчитываем эти системы крепления на бумаге. Большинство используемых в проектных институтах нормативных документов до сих пор опирается на классическую гипотезу сводообразования Протодяконова или аналитические решения теории упругости. Безусловно, для глубин в триста-четырееста метров эти методы работают великолепно. Но попытка применить их для условий глубокого рудника приводит к тому, что расчетная нагрузка на крепь получается либо заниженной (что ведет к авариям), либо неоправданно завышенной, превращая выработку в золотую по стоимости. Мы упорно продолжаем считать породу упругим телом, хотя она вокруг выработки уже давно разрушена и находится в запредельном состоянии.

Горной инженерии необходим решительный шаг в сторону численного моделирования методами конечных и дискретных элементов с обязательным учетом нелинейного поведения среды. Современные программные комплексы позволяют задавать реальную трещиноватость массива, учитывать историю его нагружения и моделировать пошаговую проходку выработки с установкой крепи. Только так можно увидеть реальные зоны концентрации пластических деформаций и понять, где именно анкер будет работать на растяжение, а где его срежет смещающимся слоем. Расчет должен давать инженеру не абстрактную цифру «давления на квадратный метр», а наглядную картину развития трещин во времени.

Более того, проектирование должно стать динамическим. Невозможно создать один паспорт крепления на километры выработки вперед, опираясь лишь на данные редких разведочных скважин. Горный инженер на участке должен иметь право и техническую возможность оперативно менять шаг установки анкеров или их тип в зависимости от того, что он видит в забое прямо сейчас. Зашли в зону разлома, увидели резкое увеличение влажности или пошли первые трещины по набрызг-бетону — паспорт крепления должен быть немедленно скорректирован в сторону усиления. Основой для таких решений должны служить экспресс-измерения с помощью контрольных индикаторов заделки анкеров и регулярный лазерный мониторинг геометрии выработки.

## **Заключение**

Резюмируя все вышесказанное, подчеркнем: успешное освоение глубоких горизонтов и сохранение устойчивости выработок невозможны без кардинальной перестройки нашего инженерного мышления.

Мы должны научиться уважать горное давление, а не пытаться бороться с ним лобовыми методами. Переход от жестких, пассивных конструкций к гибким, податливым анкерным системам, активно взаимодействующим с окружающим массивом — это единственный путь к созданию безопасных и экономически эффективных подземных рудников.

Будущее горной инженерии лежит в плоскости полного отказа от устаревших эмпирических шаблонов в пользу высокоточного компьютерного моделирования запредельных состояний породы и внедрения гибкого, адаптивного управления креплением непосредственно в процессе проходки. Только постоянный инструментальный контроль, глубокое понимание физики разрушения горных пород и способность оперативно реагировать на любые изменения геомеханической обстановки позволят нам уверенно работать на самых экстремальных глубинах, обеспечивая стабильность производства и, самое главное, сохраняя жизни людей под землей.

## Литература

1. Барон Л. И., Глатман Л. Б. Износостойкость инструмента для разрушения горных пород. — М.: Наука, 1968. — 168 с.
2. Борисов А. А. Механика подземных сооружений. — М.: Недра, 1980. — 340 с.
3. Карташов Ю. М., Матвеев Б. В., Михеев Г. В. Прочность и деформируемость горных пород. — М.: Недра, 1979. — 269 с.
4. Протоdjаконов М. М. Давление горных пород и рудничное крепление. — М.-Л.: Госгортехиздат, 1933. — 256 с.
5. Руппенейт К. В. Некоторые вопросы механики горных пород. — М.: Углетехиздат, 1954. — 384 с.