

А.Ф. Булат, академик НАН Украины,
(ИГТМ НАН Украины)
В.Б. Усаченко, инженер
(НПП Технополис «Экоиндустрия»)

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ПРИНЦИПЫ
ПРИМЕНЕНИЯ АНКЕРНОЙ СТЯЖНОЙ КРЕПИ В
БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ВЫРАБОТКАХ С ПЛОСКОЙ ПОТОЛОЧИНОЙ**

Обґрунтовані геомеханічні передумови та принципи застосування анкерного стяжного кріплення в великопролётних камерах з плоскою покрівлею

**GEOMECHANICAL PRECONDITIONS AND PRINCIPLES OF
USING ANCHOR SWIPED TIMBER IN GENERAL-SPAN
COURSES WITH PLANE TOP.**

Geomechanical preconditions and principles of using anchor swiped timber in general-span courses with plane top are given.

Анкерные крепи [1] находят все большее применение в широком спектре условий различных месторождений. Неизбежным является применение анкеров в условиях гипсовых шахт, где размеры оставляемых навсегда камер достигают по высоте до 25 м, а по ширине до 17 м. В таких условиях применение подпорных крепей технически затруднено, а экономически нецелесообразно. Нашими исследованиями [2] доказана перспектива применения на гипсовых шахтах анкерных стяжных крепей (АСК), которые обеспечивают повышение устойчивости потолочины камер за счет формирования в анкеруемом массиве зон сжатия, образующихся в результате натяжения между собой наклонно ($45-60^{\circ}$) установленных анкеров. В настоящей статье рассмотрены некоторые принципы применения АСК, что на наш взгляд, должно обеспечить повышение уровня обоснованности и области ее использования.

Мощные гипсовые месторождения разрабатываются камерно-столбовыми системами разработки со столбчатыми и ленточными целиками с оставлением защитных породных пачек в потолочине и почве. Оставляемые в потолочине подземных камер защитные пачки (3,5-9,0 м) характеризуются природной анизотропией гипсового массива (траверсально-изотропный) в силу генетического образования гипсовых пластов в условиях послойного осадконакопления. Как правило, защитные пачки состоят из 3-6 слоев, что дает основание рассматривать их как геокомпозитные несимметричные системы в связи с различной мощностью слагаемых слоев.

В условиях естественного монолитного состояния гипсового массива достаточно продолжительное время устойчивость потолочины камер обеспечивается без инженерных мер. Однако, в условиях проявления неоднородностей в потолочине пород камер, таких как геологические нарушения, развитие трещинных зон, утонения намечаемого несущего слоя, замещение над ним сплошного слоя брекчиевидными породами, разгрузка массива проведением камер вызывает раскрытие естественных и развитие послойных, наклонных и ортогональных

слоя пород трещин, что существенно снижают рабочие прочностные показатели гипса в потолочинах.

Совокупность этих факторов, в конечном счете, приводит к потере устойчивости потолочины в виде вывалообразования. Этот процесс характеризуется первоначальным формированием эпицентральных вывалов, которые со временем трансформируются в свод естественного равновесия. Прибегая к известной терминологии можно сказать, что в процессе подготовки вывала имеет место период так называемой спокойной устойчивости. Затем развивается первый вывал, а через 6-12 месяцев – второй, с формированием которого деформационный процесс переходит в режим бурной неустойчивости, завершается образованием глобального свода объединяющего в себе минисводы.

Резюмирую можно заключить, что вывалообразование в камерах – это геомеханический процесс зарождения и эволюции деформаций в породном массиве потолочины камер под влиянием естественных и техногенных факторов, обуславливающих во времени и пространстве изменение напряженно-деформированного состояния пород, структурно-фазовых переходов в массиве, которые завершаются самоорганизующихся критичностей вывалов. Здесь следует указать на физический механизм этих процессов, который протекает по смешанному типу – изгиб, растяжение, отрыв и сдвиг. Развитие этих процессов имеет механическую стадийность: плавное опускание потолочины, развитие трещин по слоям с образованием пунктирных несплошностей между слоями, скачкообразное расслоение пород, разрывы между слоями, раскрытие естественных и образование разнонаправленных трещин с образованием блочно-мозаичных вертикальных структур и деформационных шарниров, совместное развитие перемещающихся вглубь массива границ сводообразования и мульд опускающихся пород в полость камеры, что является завершающей стадией развития вывалов симметричных и асимметричных).

Полное понимание процессов позволяет сделать практически важный вывод: АСК можно возводить и спустя некоторое время после обнажения породного массива потолочины, если выявлено начавшееся расслоение несущего слоя.

Поэтому очевидным становится вывод о том, что одним из принципов повышения устойчивости потолочин камер является сохранение анизотропии защитных пачек, т.е. их квазимонолитности и квазислоистости. Совокупностью воздействий АСК препятствует фрагментация пород несущего слоя, чем предупреждается его дискретизация и уменьшение иерархичности структур. Это геомеханическая предпосылка. Теоретическая предпосылка вытекает из положений строительной механики. Цилиндрическая жесткость плиты (несущего слоя) определяется:

$$D_y = \frac{Em_{н.с.}^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости гипса несущего слоя; $m_{н.с.}$ – мощность несущего слоя; ν – коэффициент поперечной деформации.

В свою очередь поперечная жесткость определяется зависимостью:

$$D_n = \frac{3EI}{b_k^3}, \quad (2)$$

где $I = e_k m_{н.с}^3 / 12$ – момент инерции; e_k – пролет камеры (плиты).

Из выражений (1) и (2) видно, что жесткость плиты несущего слоя повышается в кубической зависимости от мощности несущего слоя, Это простое доказательство целесообразности соединения нескольких породных слоев в геоконструктивную литомеханическую систему способную воспринимать и противостоять даже большим нагрузкам от проявления горного давления. Вполне понятно, что применение АСК повысит жесткость армированной потолочины и ее значение определится из соотношения:

$$D^* = \varphi D_{ц} \quad (3)$$

где D^* – приведенная жесткость армированной потолочины; φ – коэффициент повышения жесткости потолочины анкерной стяжной крепи.

Между прогибом неармированной (ω_n) и армированной (ω_a) потолочины также устанавливается соотношение:

$$\omega_n = \varphi \omega_a \quad (4)$$

Поскольку $\varphi = \omega_n / \omega_a$, а $\omega_n > \omega_a$, то $\varphi > 1$.

Таким образом, для нашего случая

$$\varphi = 1 + \frac{\omega_n}{\omega_a} \quad (5)$$

Следующая геомеханическая особенность в устойчивости потолочины камер связана с деформационными процессами, которые имеют место в породном массиве. Незакрепленная потолочина подземных камер работает в свободном режиме деформирования, а применение любого воздействия на несущий слой изменяет этот режим, переводя его в режим запрещения (снижения) деформаций.

Длительными наблюдениями, проведенными сотрудниками ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины на гипсовых шахтах показано, что временные процессы в массиве потолочины связаны с прогибом несущего слоя, т.е. с формированием мульды опускания потолочины и расслоением пород. Установлена взаимосвязь во времени между величиной опускания потолочины и пролетом камеры при практически одинаковых показателях прочности гипса несущего слоя.

Из положений сопротивления материалов следует, что прогиб балки по ее центру изменяется пропорционально четвертой степени ее пролета, а изгибающий момент пропорционально ее длине, поэтому даже по технологическим соображениям пролет камеры можно увеличивать до оптимальной величины. В

приложении к нашей задаче, с определенной степенью идеализации, можно записать:

$$\omega_{\max} = \frac{\omega_0}{24EI} l^4, \quad (6)$$

где ω_0 – значение прогиба потолочины до развития трещинообразования.

В практических целях обоснования регламента применения анкерной стяжной крепи из этих рассуждений важно установить точки перегиба несущего слоя. Из сопромата известно, что точки перегиба расположены на расстоянии одной трети пролета от геометрической середины балки. Это означает, что при пролете камер 10 м эти характерные точки находятся на удалении 3,3 м от середины камеры. Следовательно, от точки перегиба до опоры целика остается 1,7 м, поэтому считаем, что это место установки подкладок, передающих нагрузки на несущий слой пород при натяжении АСК. Таким образом, установка анкера должна осуществляться посредине этого участка, т.е. на расстоянии 0,85 м от целика. Безусловно, эти величины будут изменяться в зависимости от ширины камер. Из этих, в общем-то, теоретических рассуждений вытекает важное практическое следствие. Применение АСК обеспечивает перевод схемы нагружения несущего слоя на четырехточечную (две опоры и две точки нагружения крепью), при которой снижается влияние срезающих сил и концентрация напряжений в приопорных зонах. Добавим, что уменьшение или перенос даже части растягивающих напряжений из плоскости потолочины вглубь массива повышает несущую способность первого слоя со стороны камеры.

Рассматривая вопрос прогиба несущего слоя в полость камеры, следует определить его величинами. Исследованиями ВНИИСоль А.Ф. Савченко показано, что трещинообразование в гипсах начинается при относительной величине деформаций равной $4,85 \cdot 10^{-4}$. Нашими исследованиями и наблюдениями установлено, что величина расслоения пород в защитной пачке (отрыв несущего слоя) достигает при 7-12 мм. Таким образом, среднюю величину относительной деформации расслоения можно принять равной $9,5 \cdot 10^{-4}$. При этом формируются пунктирные несплошности в слоях и между ними. Специалистами ВНИМИ, проведенными в условиях Новомосковской гипсовой шахты установлено, что средняя относительная деформация при обрушении гипсового пласта мощностью 1,5 м составила $(24-34) \cdot 10^{-4}$. Отсюда вытекает следующий принцип предотвращения вывалов из потолочины – деформационный: регламентный режим поддержания потолочины должен исключать предразрушение защитной пачки и обеспечивать режим упруго-вязких и упругопластических деформаций массива, когда относительная деформация не больше величины $9,5 \cdot 10^{-4}$.

АСК обеспечивает самообжатие пород, так как гравистатические нагрузки воспринимаются массивом и анкерной системой, т.е. имеет место тормозящий эффект, уровень которого определяется деформационно-силовыми параметрами крепи.

Второй геомеханической особенностью деформационных процессов установленной нами является сводообразование, которое завершается обрушением

пород элементов защищенной пачки потолочины. Таким образом, в потолочине камер имеет место развитие двух противопоставленных процессов: формирование мульды опускания потолочины и дрейф свода естественного равновесия завершающегося вывалообразованием. Здесь имеет место такая геомеханическая особенность: прогиб несущего слоя сопровождается образованием плоских непрерывностей по напластованию, а породы второго за ним слоя переходят из трехосного в двухосное напряженное состояние, что снижает несущую способность потолочины. Именно пунктирные непрерывности являются очагами зарождения внутрислоевого и межслоевого разрушения, а пересечение их с границами развивающегося фронта свода естественного равновесия или вывала является одним из условий формирования вертикальной мозаики в гипсовом массиве и вывалообразования в камерах.

Отсюда следует практически важный принцип: повышение устойчивости потолочины может быть обеспечено уменьшением интенсивности указанных двух процессов. Техническая реализация этого принципа в выработках больших пролетов и высоты должна быть связана с созданием породо-механических армированных анкерными систем, обеспечивающих повышение приконтурной (поверхностной) и глубинной устойчивости гипсового массива

Самозапирание системы “массив-АСК”, исходя из теоретических представлений, уменьшает вогнутость поверхности прогиба несущего слоя и поднимает осевую линию.

Углубляя понимание процессов деформирования и обрушения большепролетных потолочин, следует указать на их механизм в разных режимах нагружения массива несущего слоя. Анализ теоретических и экспериментальных результатов показывает, что опускание несущего слоя по геометрической середине камер происходит в условиях отрыва (расширения) пород. В таких условиях имеет место симметричное формирование вывала. В условиях, когда вывалы формируются в приопорных зонах потолочины, и в большинстве случаев углы наклона полости вывала к плоскости потолочины составляют $45-60^{\circ}$, ответственными за вывалообразование являются срезающие усилия, т.е. сдвигающие напряжения. Из изложенного следует вывод: повышение устойчивости приконтурных пород к камере может быть достигнуто изменением вида напряженного состояния массива, т.е. трансформацией (переводом) его из растяжения на изгиб, из растяжения и сдвига на сжатие.

Следую физическим терминологическим определениям в оценке состояния статически неоднородных структур [3], можно заключить, что в поведении сложноструктурной потолочины проявляется ближний и дальний порядок. Учитывая, что потолочина представляет собой разупрочняющуюся структуру определяющим в ее поведении является ближний порядок. По-существу, ближний порядок – это необходимость обеспечения приконтурной (поверхностной) устойчивости несущего слоя, контактирующего с пригружающим слоем.

Именно механизм работы анкерной стяжной крепи обеспечивает формирование как квазимонолитной конструкции массива, так и сжимающих зон в по-

родах за счет нагружения и самозапираания литомеханической системы и за-прещения (уменьшения) деформаций опускания несущего слоя

Задача здесь состоит в том, что необходимо обеспечить нагружение массива пород потолочины в эпицентральных деформационных зонах (середина камеры и приопорные участки), чтобы выровнять напряжения в массиве, исключив перенапряжение гипса в условиях растяжения и сдвига, а, следовательно, предотвратить отслоение нижней части несущего слоя, подверженного изгибу.

Анкерная стяжная крепь по своему механизму работы наилучшим образом отвечает геомеханике устойчивости большепролетных и большевысотных камер, ибо рамные (подпорные) крепи технически и экономически в таких условиях бесперспективны.

Рассматривая принципы применения АСК, следует обратиться еще раз к механизму ее воздействия на породный массив потолочины. Из публикации [4] известно, что АСК при включении в работу формирует в породах так называемую шпренгельную систему, при которой в массиве создаются зоны сжатия, а вся стержневая конструкция крепи работает на растяжение. Принимая во внимание принцип малоэнергетического воздействия, очевидной становится задача – нагрузка на несущий слой потолочины, передаваемая на него в процессе натяжения крепи, должна быть не максимально возможной, а меньше предельных возможностей, определяемых конструктивной прочностью АКС. Это согласуется с законом Йеркса-Додсона, согласно которому наибольшее значение какой-то характеристики в системе, например, подпора АСК, достигается при некотором среднем уровне первоначальных энергетических затрат, т.е. при среднем усилии энергетических затрат. Это оправдано также с той точки зрения, что максимальный подпор (натяжение) АСК будет достигнут со временем за счет опускания потолочины, которое выступает как энергетический фактор самозапираания литомеханической охранной системы “несущий слой – АСК”. При таком механизме работы указанной системы можно вести речь о стесненной дилатансии при ограниченной деформации пород несущего слоя, когда взаимодействие системы “крепь – массив” характеризуется как квазиравновесное, поскольку обеспечивается поглощение деформаций опускающегося несущего слоя конструктивной податливостью крепи при условии равнонагруженности АСК. Крепь способствует увеличению прогиба потолочины при большей монолитности пород. Отсюда следует важный вывод относительно выбора (назначения) податливости АСК монтажной, технологической, конструктивной и предельной (эксплуатационной). Общей податливостью АСК должна обеспечить мягкое высвобождение энергии из породного массива при прогибе потолочины камер, чем будет достигнута некатастрофическая разгрузка эпицентральных высокоэнергонасыщенных зон породного массива. Здесь следует добавить, что важным фактором, влияющим на работу АСК, является некогерентное высвобождение энергии разных слоев, в частности, несущего слоя потолочины и пригружающего слоя. Обеспечить такой механизм можно разноглубинным анкерованием потолочины, например, анкерами длиной до 1,5 м посередине камеры.

Следующие геомеханическая и горно-технологическая предпосылки связаны со временем возведения АСК. Общеизвестно, что наилучшим образом анкер работает при его возведении сразу после обнажения породного массива. Однако упрочнение породного массива анкерами осуществляется и спустя некоторое время после проходки выработки, к примеру впереди движущегося забоя лавы. Для гипсовых шахт эта предпосылка повсеместна. В применении АСК выделяется также два регламента поэтапного анкерования потолочины. Первичный этап – возведение АСК сразу после обнажения массива потолочины, вторичный – спустя некоторое время после нахождения камеры в эксплуатации при выявленном расслоении пород несущего слоя. По сравнению с обычной анкерной крепью АСК в таких случаях имеет преимущества АСК – это подпорно-самонапрягающая крепь активного действия, конструкция которой неопределенных размеров с высокой грузонесущей способностью и регулируемой податливостью, самозапирание которой обеспечивает повышение квазимонолитности (смыкание вертикальных трещин) и квазислоистости (смыкание горизонтальных трещин). Породный массив становится элементом грузонесущей конструкции.

Применение АСК в большепролетных камерах 2-3 натяжных (стяжных) систем в условиях различных пролетов камер и прогнозируемой высоты вывалобразования обуславливает еще некоторые геомеханические особенности работы крепи. Во-первых, разная высота прогнозируемого вывала, вызывает необходимость разноглубинного анкерования породного массива. Во-вторых, разноглубинное анкерование потолочины с перекрестно-наклонным расположением анкеров формирует в потолочине камер геомеханический клин запирания пород в зоне потенциального вывала. Это так называемый большой геомеханический клин. Малые геомеханические клины формируются под подкладками, передающими нагрузку на несущий слой (рис. 1).

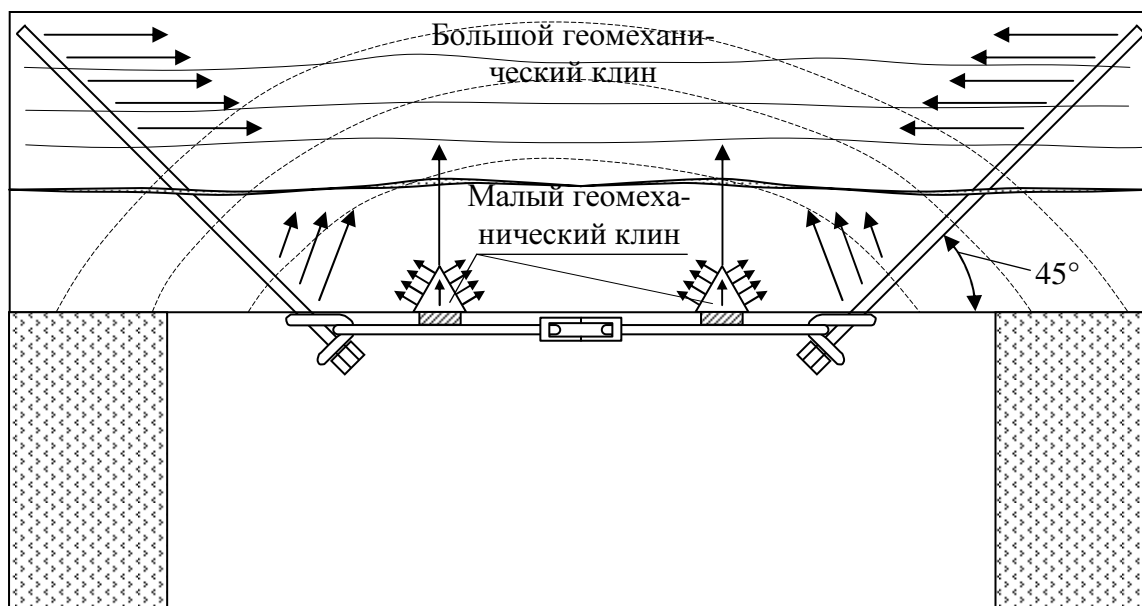


Рис. 1 – Формирование большого и малых геомеханических клинов при возведении АСК

Заимствуя выводы из механики грунтов [5] о воздействии штампа на основание можно заключить, что под подкладкой формируется жесткое ядро в виде клина, который назван нами малый геомеханический клин. Считают, что при нагрузках до 0,06-0,08 МПа (подпор АСК) ядро имеет форму треугольника с углом при основании равным углу внутреннего трения пород. При увеличении нагрузки до 0,25 МПа угловая точка у вершины сохраняется, но усиливается боковой распор от ядра. При увеличении прочности пород несущего слоя высота ядра уменьшается.

Для практики интересно отметить, что с увеличением ширины подкладки (на примере штампа) в «n» раз сопровождается ростом нагрузки передаваемой на несущий слой в «n²» раз.

На базе изложенного разработана матрица факторов воздействия АСК на потолочину камер и принципов управления ее деформационным состоянием (рис. 2).



Рис. 2 – Матрица факторов воздействия и принципов управления состоянием потолочин камер с помощью АСК

Из таблицы следует, что основными принципами являются:

1. Сохранение (усиление) квазимонолитности и трансверсальной изотропности пород защитной пачки над камерами;
2. трансформация вида НДС породного массива из состояния растяжения и сдвига в состояние сжатия;
3. снижение интенсивности формирования мульды опускания потолочины в полость камеры и развития сводообразования, завершающегося вывалами;
4. обеспечение деформационного режима (регламента) поддержания потолочины камер при условии, что относительная деформация расслоения несущего слоя не превышает величины равной $9,5 \cdot 10^{-4}$ и обеспечивается условия протекания деформационного процесса в упругопластическом режиме.
5. обеспечение принципа оптимального воздействия АСК на несущий слой;
6. Формирование геомеханических клинов распора в потолочине камер путем перекрестно-наклонного возведения анкеров 2-3 стяжек в зоне потенциального вывала подпор, которыми достигается при среднем уровне энергетических затрат, а дальнейшее его увеличение за счет прогиба потолочины создаст условия ограничения деформаций пород и стеснения их дилатансии.

Резюмируя изложенное, можно заключить, что разработка регламента повышения устойчивости потолочины большепролетных камерных выработок анкерными системами требует наличия таких предпосылок:

- 1) умения оценивать и прогнозировать горно-геомеханические условия применения анкерного крепления на базе анализа структурных и физико-механических показателей свойств пород потолочины;
- 2) знания закономерностей деформирования пород потолочины во времени и пространстве с целью оценки особенностей их взаимодействия с анкерной системой;
- 3) наличия разработанных принципов и регламентов управления устойчивостью потолочины камер в атипичных условиях и эффективных конструкций АСК для воздействия на породный массив;
- 4) наличия теоретической (эмпириоаналитической) базы обоснования параметров применяемых анкерных систем;
- 5) располагать методиками и инструментарием контроля работы анкерной системы и оценки изменения геомеханического состояния пород потолочины при применении анкеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат А.Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт [Текст] / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов. – Днепропетровск: Вільпо, 2002. – 372 с.
2. Булат А.Ф. Перспективний напрямок створення охоронних конструкцій гірничих виробок із застосуванням анкерних натяжних систем [Текст] /А.Ф. Булат, В.Б. Усаченко, В.В. Левіт // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. научн. пр. /ЛІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ, 1997. – Вип. 3. – С. 3-10.
3. Кандауров И.Н. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. Л., Стройиздат, 1996. – 319 с.
4. Claube с. Pat 3427811 (USA), White, Mine roof support system, - Опубл. 18.02.69.
5. Горбунов-Посадов М.И. Устойчивость фундаментов на песчаном основании, НИИОПС. – М., Госстройиздат, 1962. – С. 29-96.