

## ЛЕКЦИЯ №1

Курс «Управление состоянием массива» направлен на ознакомление с подходами и методами решения практических задач геомеханики, с которыми сталкиваются горняки в своей повседневной деятельности.

Под управлением состояния массива горных пород следует понимать регулирование характера и параметров геомеханических процессов с целью повышения безопасности горных работ и их эффективности. Регулируя развитие геомеханических процессов в массиве пород, стремятся достичь такого положения, чтобы процессы развивались в безопасном направлении и их параметры находились в пределах заранее установленных безопасных величин.

Основным объектом исследований является **породный массив**, а точнее, механические процессы, происходящие в массиве и связанные с проведением в нём горных выработок.

Массивы горных пород образуют особые физические среды, состояние которых определяется тремя составляющими:

- 1 - свойствами горных пород;
- 2 - структурными особенностями;
- 3 - естественным напряженным состоянием.

Управление состоянием массива пород необходимо осуществлять на всех стадиях освоения месторождений полезных ископаемых или подземного строительства.

На практике при разработке месторождений полезных ископаемых в настоящее время применяют следующие основные способы управления состоянием массива горных пород:

1. Крепление выработок и выработанного пространства. Применяют для капитальных и подготовительных горных выработок. Для очистных выработок применяют в случае, когда полезное ископаемое и вмещающие породы неустойчивы и требуют поддержания. В качестве крепи используют деревянные стойки и костры; каменную бутовую и кирпичную кладку; монолитный бетон и бетонные полосы; столбы, металлические конструкции и стойки; механизированную ограждающую крепь, анкерную крепь и набрызг-бетон и др. Назначение крепи заключается в снижении деформаций и предотвращении разрушений (отслоений, вывалов, трещинообразования) обнажённых пород призабойного пространства в течение определённого времени, необходимого для производства работ.

2. Поддержание выработанных пространств целиками. Этот способ заключается в обеспечении устойчивого равновесия массива подработанных пород и предотвращении обрушения земной поверхности. Месторождения в этом случае отрабатывают системами с открытым очистным пространством, сущность которых заключается в выемке камер и оставлении прочных целиков между ними.

Рассматриваемый способ управления состоянием массива горных пород применяют тогда, когда полезное ископаемое и породы обладают высокой устойчивостью при сравнительно невысокой ценности полезного ископаемого, а также при необходимости сохранения земной поверхности (при наличии объектов подлежащих охране). При отработке высокоценных руд целики могут заменяться надёжными искусственными опорами (бетонными, каменными).

3. Поддержание выработанного пространства временно оставляемой (магазинированной) отбитой рудой. При этом способе, применяемом для отработки маломощных кругопадающих (жильных) месторождений, в процессе отработки блоков 60-70% отбитой руды временно оставляют в выработанном пространстве для поддержания обнажений висячего и лежачего боков, склонных к частичным вывалам и обрушениям. В целом, руды и породы должны быть достаточно устойчивыми, чтобы в очистном забое кровля и бока не обрушались и обеспечивали безопасное ведение очистных работ.

4. Закладка выработанного пространства. В неустойчивых, склонных к обрушению породах после выемки (или одновременно с выемкой) полезного ископаемого для

предотвращения опасных деформаций выработанное пространство заполняют закладочным материалом. В качестве закладочных материалов используют дроблённые пустые породы, песок, гравий, шлаки металлургических заводов и электростанций, хвосты обогатительных фабрик. Наиболее надёжным средством поддержания являются твердеющие (бетонные) смеси при условии полного подпора кровли выработанного пространства закладочным материалом и своевременного выполнения работ по закладке.

5. Управление состоянием массива посредством обрушения пород. Сущность этого способа заключается в последовательном обрушении налагающей толщи пород вслед за подвиганием очистных работ. В связи с тем, что в результате выемки полезного ископаемого и подработки пород увеличивается опорное давление на прилегающий массив и возрастаёт опасность недопустимого деформирования (даже раздавливания) пород необходимо периодически снижать величину опасных напряжений путём обрушения подработанной толщи пород.

Обрушение может быть **частичным** (обрушаются только нижняя пачка пород - непосредственная кровля или часть вышележащей толщи пород) или **полным** (в процессе обрушения вовлекается вся толща пород до земной поверхности). Вполне очевидно, что во втором случае происходит основная разгрузка прилегающего массива горных пород.

Применительно к кругу задач, решаемых в геомеханике, породы классифицированы **по характеру связей между их частицами**. По этому признаку следует выделить несколько классов пород.

Свойства пород зависят от их состава и строения. Состоят горные породы из минералов. Известно около 3000 различных минералов, однако в составе горных пород существенную роль играют только немногим более 20 так называемых породообразующих минералов, наиболее распространенных в земной коре.

По минералогическому составу различают **монаминеральные** и **полиминеральные** горные породы. Примерами монаминеральных пород являются песчаник, известняк, мрамор, гипс и др. Большинство пород принадлежит ко второму типу.

К строению пород относят размеры, форму, взаимное расположение и способ срастания слагающих их минеральных частиц. Важнейшими признаками строения пород являются их **структура и текстура**.

Под **структурой** понимают строение минерального агрегата, т.е. степень кристаллизации пород (кристаллическое или аморфное их строение), размеры, форму минеральных частиц и характер связей между ними.

По степени кристаллизации пород выделяют полнокристаллические, неполнокристаллические, стекловатые, порфировые и обломочные структуры.

По крупности кристаллических зерен различают породы гиганто-, грубо-, крупно-, средне-, мелкозернистой, афанитовой и скрытокристаллической (микрокристаллической) структур.

Выделяют также породы **равномернозернистой** структуры, сложенные из кристаллов примерно одинаковых размеров, и **неравномернозернистой** структуры, в которых размеры слагающих их кристаллов существенно различны.

Свойства пород неполнокристаллической, порфировой и обломочной структур существенно зависят от характера цементации и состава цементирующего (стекловатого) вещества.

Состав цемента (стекла) может быть самым разнообразным: кремнистым, железистым, известковистым, глинистым, мергелистым, гипсовым и т. д. Наибольшей прочностью обладают породы с кремнистой и железистой цементацией, наименьшей - с гипсовой, глинистой.

Другим важнейшим признаком строения пород наряду со структурой является их **текстура**. Под текстурой (сложением) понимают взаимное расположение структурно однотипных частиц породы в занимаемом ими пространстве.

Под **пористостью** горной породы понимают суммарный относительный объем содержащихся в ней пустот (пор). Суммарный относительный объем открытых (сообщающихся) пор характеризует **открытую пористость**  $P_o$  горной породы. Суммарный относительный объем закрытых (замкнутых) пустот называют закрытой или изолированной пористостью  $P_i$ . Пористость, которая определяет движение в породе жидкостей и газов, называют эффективной пористостью  $P_e$ . **Общая пористость**  $P$  определяется совокупностью закрытых и открытых пор. Отношение объема пор к объему минерального скелета называют **коэффициентом пористости**  $K_p$ .

Поры по размеру разделяют на три класса: сверхкапиллярные (более 0,1 мм), капиллярные (0,002-0,1 мм) и субкапиллярные (менее 0,0002 мм).

Число физических свойств горных пород, проявляющихся в их взаимодействии с другими объектами и явлениями материального мира, может быть сколь угодно велико. В качестве основного признака классификации физических свойств пород наиболее целесообразно принять **внешние поля или воздействия, во взаимодействии с которыми проявляются те или иные свойства**. На основе этого признака можно выделить следующие классы физических свойств горных пород: плотностные, механические, горнотехнологические, тепловые, электромагнитные, радиационные.

Для решения задач геомеханики необходимы, в первую очередь, плотностные, механические и горнотехнологические свойства.

Для решения отдельных вопросов геомеханики представляют **горнотехнологические свойства**, которые являются откликом массива пород на технологические воздействия и потому отражают не только свойства, но и состояние пород.

К их числу относится — **коэффициент крепости**  $f_{kp}$ , введенный для характеристики сопротивляемости пород механическим воздействиям.

Другой, характеристикой является **коэффициент разрыхления**  $K_p$ , представляющий собой отношение объема  $V_p$  породы после ее разрыхления при обрушении или добычи к объему  $V_m$  в массиве, т. е. до разрыхления.

Одной из существенных характеристик разрыхленных горных пород является также **коэффициент трения**  $f_o$ , который в отличие от коэффициента внутреннего трения  $tgr$  характеризует условие перемещения отдельных блоков пород друг относительно друга, после того как нарушается сплошность массива. Значения коэффициентов трения колеблются в очень широких пределах, зависят от большого числа факторов, в частности от состава, строения, степени твердости пород, шероховатости труящихся поверхностей и составляют преимущественно 0,11-0,36.

В литосфере выделяют два вида (или два различных порядка) структурных элементов - **глубинные и коровые** тектонические **структуры**.

В пределах этих структур в зависимости от размеров выделяются различные порядки неоднородностей.

**Глубинными** тектоническими структурами **первого порядка** являются континенты и океанические области коры. Глубинные структуры **второго порядка** - это подвижные геосинклинальные пояса и относительно устойчивые платформы.

**Коровые** тектонические структуры, в отличие от глубинных, менее развиты на глубину и, как правило, не выходят из пределов земной коры. Они образуют складчато-разрывные деформации различных порядков, имеющие линейные размеры по простиранию максимально до десятков, иногда нескольких сотен километров.

Разработаны различные классификации структурных неоднородностей, одна из наиболее удачных предложена докт. физ.-мат. наук М.В. Рацем, который выделил несколько различных порядков структурных неоднородностей.

К **неоднородностям нулевого порядка** М.В. Рац отнес крупные тектонические разрывы, связанные с региональными полями тектонических напряжений, разбивающие массивы пород на блоки с линейными размерами выше 10 км, это по своей сути региональные структурные неоднородности земной коры III-IV порядков.

Далее выделяются структурные неоднородности, относящиеся собственно к массиву пород в масштабах отдельных месторождений.

**Неоднородности первого порядка** обусловлены наличием в массиве различных по составу, структуре и текстуре пород, крупных геологических нарушений, тектонических разрывов и т. д. Эти неоднородности расчленяют массив на блоки размерами от сотен метров до километров.

Более мелкие блоки размерами от десятков сантиметров до десятков метров связаны с **неоднородностями второго порядка**.

К этому классу относят неоднородности структуры и состава пород в пределах одной пачки, слоя, а также естественную трещиноватость.

**Трещинами** называют разрывы в горных породах, перемещения по которым совершенно отсутствуют или очень незначительны.

По степени проявления различают следующие три группы трещин: открытые, закрытые и скрытые.

Естественные трещины обычно образуют в массиве **системы** или ряды. Трещины одной системы имеют параллельные или близкие к параллельным направления, но не могут пересекаться друг с другом. Часто встречаются две или три системы трещин, пересекающихся друг с другом под углами, близкими к прямым.

Последняя группа принадлежит к неоднородностям следующих, более высоких (третьего и четвертого) порядков.

Трещины крупноблочной трещиноватости имеют протяженность, исчисляемую десятками и даже сотнями метров. Протяженность отдельных трещин мелкоблочной трещиноватости исчисляется метрами и дециметрами. Микротрещины образуют структурные блоки с сантиметровыми размерами.

Различные массивы пород в разной степени расчленены трещинами. Среднее число параллельных трещин (отклонение элементов залегания  $\pm 10^\circ$  от среднего по азимуту и по углу падения), приходящееся на единицу длины  $l$  (в направлении, перпендикулярном к трещинам), часто называют **густотой** или **плотностью** трещин. Это же число  $n = 1/l$  называют также линейным модулем трещиноватости соответствующей системы трещин. Линейный модуль является критерием сравнительной оценки степени выраженности в массиве трещин той или иной системы.

Сравнительная оценка развития общей трещиноватости различных массивов или разных участков некоторого массива может быть выражена объемным **модулем трещиноватости**  $W$ , представляющим собой безразмерное отношение единичного объема массива  $1 \text{ м}^3$  к среднему объему  $V$  структурного блока.

Другим критерием для сравнительной оценки трещиноватости массивов горных пород может явиться **акустический показатель трещиноватости**  $A_i$  определяемый как отношение скоростей упругих колебаний в монолитном образце породы и в трещиноватом массиве. В зависимости от степени развития трещиноватости массивов этот показатель может принимать значения от 0,9-1,0 для практически монолитных нетрещиноватых пород, до 0,0-0,1 для весьма трещиноватых мелкоблочных пород.

Всё изложенное позволяет говорить об общих закономерностях структуры, характерных для верхней мантии и земной коры, и проявляющихся в **едином иерархически-блочном строении**, которое можно проследить от планетарных структур типа континентов до микроструктур на уровне кристаллов и отдельных минеральных зёрен.

Различие показателей свойств горных пород в зависимости от абсолютных геометрических размеров участков породного массива, обусловленное проявлением влияния неоднородностей различных порядков, называют **масштабным эффектом**.

Поскольку при оценке устойчивости выработок, целиков часто возникает необходимость характеризовать те или иные свойства массива по данным испытаний образцов в лаборатории, в практике находят применение так называемые **коэффициенты структурного ослабления**  $\lambda_i$ , характеризующие степень снижения показателей

соответствующих механических свойств массива пород вследствие наличия в массиве естественных трещин или других поверхностей структурных неоднородностей.

Коэффициенты структурного ослабления  $\lambda_i$ , могут быть определены для большинства прочностных и деформационных характеристик - пределов прочности на сжатие и растяжение, модуля упругости  $E$ , сцепления [ $\tau_0$ ], угла внутреннего трения  $\phi$  и др.

Породные массивы имеют одну очень существенную особенность по сравнению с объектами, рассматриваемыми в механике вообще или в механике твёрдых деформируемых тел, в частности. До производства работ, т.е. ещё в своём изначальном состоянии они уже находятся в напряжённом состоянии, которое обычно называют **естественному** или **начальным напряжённым состоянием**.

Кроме того, глубинные разломы и разрывы земной коры являются теми естественными швами, по которым на протяжении всей геологической истории Земли непрерывно происходили тектонические движения. Силы, обуславливающие тектонические движения, называют **тектоническими**.

По современным представлениям **напряженное состояние земной коры** в общем случае **определяется действием в земной коре двух независимых силовых полей**. Одно из них - **гравитационное поле** - в соответствии с законом всемирного тяготения Ньютона, другое - **тектоническое поле** - обусловлено неравномерным распределением в пространстве скоростей тектонических движений и скоростей деформаций земной коры, т.е. наличием **градиента тектонических движений**.

К настоящему времени установлены основные закономерности в распределении тектонических сил:

1. Горизонтальные напряжения приурочены к районам восходящих движений блоков земной коры;
2. Региональные поля напряжений соответствуют общим структурам месторождений;
3. Наиболее высокие значения горизонтальных напряжений отмечаются у границ блоков вблизи геологических нарушений, в самих зонах геологических нарушений горизонтальные напряжения имеют сравнительно невысокие значения;
4. В элементах гористого рельефа высокие значения горизонтальных напряжений наблюдаются:
  - ниже дна долин;
  - выше местных базисов эрозии, ближе к вершинам гор горизонтальные напряжения минимальны по величине;
  - количественные различия достигают 3-5 раз.

Здесь коэффициент  $\xi$  называется **коэффициентом бокового давления** или **коэффициентом бокового распора**. Этот коэффициент показывает, какую часть вертикальной нагрузки, действующей в рассматриваемой точке массива, составляют силы или напряжения, действующие в горизонтальной плоскости.

Для горных пород коэффициент поперечных деформаций  $\nu$  изменяется в пределах от 0,08 до 0,5, соответственно крайние возможные пределы изменения  $\xi$  составляют от 0,1 до 1. Следует подчеркнуть, что в соответствии с физическим смыслом коэффициента  $\nu$ , его значения не могут превышать 0,5, поэтому и значения коэффициента бокового давления  $\xi$  не могут быть больше 1. В противном случае среда теряет свою сплошность.

При слоистом строении массива значения горизонтальных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  определяются конкретными значениями коэффициентов поперечных деформаций  $\nu$  для соответствующего слоя. В связи с этим, если вертикальное напряжение  $\sigma_3$  будет монотонно возрастать по мере увеличения глубины рассматриваемых слоев, то горизонтальные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  при общей тенденции возрастания могут, как увеличиваться, так и уменьшаться при переходе от слоя к слою.

Главное напряжение  $\sigma_3$ , обусловленное действием гравитационных сил, может в отдельных случаях отклоняться от вертикали вследствие наклонного залегания отдельных

слоев пород, их складчатости и различной мощности, а также при сложном рельефе поверхности или наличии пустот в недрах. Отклонения эти обычно не превышают нескольких градусов, в редких случаях достигая  $10-15^\circ$ .

Изменение горизонтальной составляющей гравитационного поля напряжений по глубине характеризуется *градиентом гравитационных напряжений*  $\Delta\sigma_z$ , который также является функцией средней плотности пород, слагающих массив, и составляет  $0,25-0,32 \text{ кгс}/(\text{см}^2 \cdot \text{м})$ .

Предельные значения  $\nu = 0,5$  и  $\xi = 1$  выражают, как это следует из формулы (4.2), условие *гидростатического* распределения напряжений в массиве, т. е. такого распределения, когда

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \quad (4.3)$$

Поля тектонических напряжений гораздо менее однородны, чем поля гравитационных напряжений. Их параметры могут значительно изменяться как в пространстве, так и во времени. В частности, изменчивы ориентировка осей главных напряжений и их абсолютные значения. Поскольку в большинстве случаев тектонические напряжения действуют в горизонтальных или близких к ним направлениях, изменение тектонических напряжений по глубине может быть охарактеризовано *вертикальным градиентом тектонических сил*  $\Delta\sigma_m$ , выражающим зависимость максимального главного горизонтального сжимающего напряжения от глубины.

В заключение отметим, что вследствие иерархично-блочной структуры массивов горных пород, логично предположить, что иерархично-блочную структуру должно иметь и начальное поле напряжений. При этом, поскольку гравитационное поле действует повсеместно и определяется плотностными свойствами и глубиной рассматриваемой точки от дневной поверхности, по-видимому, именно тектоническая составляющая обуславливает иерархичность общего поля естественных напряжений массива пород.