

УДК 622.272:62-75

*Н.И. Ермаков***ИНИЦИИРОВАННЫЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ  
ДЕФОРМАЦИИ, КАК ПРИЧИНА РАЗРУШЕНИЯ  
ПОДРАБОТАННОЙ ТОЛЩИ ПОРОД**

Семинар № 3

**П**ри ведении горных работ в подземных условиях всегда имеется опасность внезапных обрушений поверхности, что влечет за собой деформации и последующие разрушения инженерных сооружений и зданий вблизи этих провалов. Как и почему происходят деформации покрывающей толщи пород над выработанным пространством хорошо и полно изложено в монографии А.Д. Сашурина «Сдвигение горных пород на рудниках черной металлургии» [1]. Он отмечает, что в настоящее время на основе текущих замеров деформаций можно надежно для практических целей прогнозировать поведение подработанного массива в будущем, тем самым решать вопросы охраны сооружений, попадающих в зону влияния подработки. Вместе с тем, в этой монографии он пишет, что в своей практической деятельности и в литературе часто встречаются исключительные случаи деформирования подработанной породной толщи. Например, им замечено, что на исследуемых лабораторией сдвигения горных пород ИГД УрО РАН десяти рудных месторождениях выявлены случаи вертикальных поднятий земной поверхности, как относительно начального положения реперов, так и относительно предыдущих замеров. Наибольшее количество случаев поднятий земной поверхности за соответствующий период исследования сдвижений отмечено на Сарановском месторождении в Пермской области. Это 55 % случаев от общего количества замеров положения маркшейдерских реперов.

Аномалии положения горизонтальных векторов сдвижений массива при отработке рудных залежей встречаются тоже не редко. Вектора сдвижений поверхности в зоне проседания массива при так называемых аномальных сдвигениях имеют различную ориентировку по отношению, как к контуру обрушения, так и к друг другу. Иногда они имеют направление противоположное центру провала. Форма обрушений поверхности сама разнообразная, хотя А.Д. Сашурин для упрощения аппроксимирует этот контур обрушения в текущее время в виде круга или эллипса, как это делают и другие исследователи. Углы обрушений массива и сдвижений на конечном контуре для большинства Уральских месторождений оказываются также аномальными по отношению к деформациям подработанной толщи многих угольных месторождений. Также как и аномальным часто является и положение самой мульды сдвижения и провала относительно очистного пространства.

На взгляд автора этой статьи количество аномалий в сдвигении подработанной толщи является вполне достаточным, чтобы приступить к разработке новой практической модели деформирования породного массива, заключенного между дневной поверхностью и очистным пространством. Существующая универсальная модель обрушения породной толщи с последующими деформациями периферийной части провала и мульды сдвижения в целом совсем не отражает сложности поведения подработанной толщи пород. Ведь действующая в индуктивных докумен-

тах модель сдвижения сводится к послыльному изгибу породной толщи со смещением слоев и к разрушению породной потолочины под действием веса пород в выработанное пространство.

Современное представление о массиве как об иерархически структурированной среде несколько меняет точку зрения на сам породный массив и механизм его устойчивости в подработанном состоянии, но еще не лишает научной опоры устоявшихся представлений о механизме разрушения на базе устойчивости эквивалентных пролетов. В эту модель обрушения потолочины могут быть введены поправочные коэффициенты на размер структурных блоков, после чего модель снова «оживет».

Установленное экспериментально и даже теоретически на математических моделях глобальной тектоники плит тектоническое поле напряжений на рудных месторождениях дает некоторый сбой для научной обоснованности модели эквивалентных пролетов теории упругости, поскольку все разрушения в подработанной породной толще должны реализовываться при объемном напряженном состоянии в условиях сжатия. Согласно закономерностей перераспределения напряженного состояния породных массивов под влиянием очистных работ, установленных теоретически С.В. Кузнецовым [2] и подтвержденных автором данной статьи на Североуральских и Южноуральских бокситовых месторождениях, в породах кровли присутствует сдвиговой механизм разрушения. В этом случае вертикальная компонента напряжений на достигнутых глубинах разработки рудных залежей (в пределах 100–600 м) намного ниже, чем горизонтальная компонента напряжений ( $\sigma_r$ ). Эта компонента непосредственно вблизи кровли очистного пространства для горизонтальных рудных залежей ориентировочно равняется:

$$\sigma_r = \sigma_1 - \gamma H, \quad (1)$$

где  $\sigma_1$  – максимальная тектоническая компонента напряжений;  $\gamma$  – средняя плотность пород в массиве ( $\text{т/м}^3$ ) или градиент изменения вертикальной компоненты напряжений (МПа/м);  $H$  – глубина очистного пространства

Итак, объемное напряженное состояние породного массива подработанной толщи, где отсутствуют растягивающие напряжения и деформации, требуют реализации иной модели разрушения, чем принята в инструктивных документах. Какой же должна быть модель разрушения и модель деформации подработанной толщи?

В этом случае при устойчивости подработанного массива придется обращаться не к усредненному показателю прочности массива потолочины и не к усредненному показателю действующих напряжений в этой потолочине, а к самым слабым участкам покрывающей толщи в пределах контура очистного пространства, а также к уровню напряжений на соответствующих участках массива. Ослабленными участками массива являются среды с тектоническими нарушениями, поэтому ответ на поставленный вопрос разбивается на ряд вопросов в связи с простираем дизъюнктивов, их падением, геометрическими размерами, временем их образования, их мозаикой в пространстве и залеченностью швов.

Учитывая неоднородность тектонических напряжений в интересующей области массива, и воздействие на массив энергетических источников в форме сейсмики, а также присутствие дополнительных ослаблений за счет влажности швов трещин, мы должны рассмотреть множество моделей деформирования подработанной толщи. Однако на каждом месторождении действует своя специфическая модель, включающая соответствующие параметры сило-

вого поля и ослаблений массива, хотя для многих из них есть сходные геологические и технологические позиции. Например, на

большинстве месторождений Урала покрывающая залежь породная толща представлена вулканогенными породами или пронизана скрепляющими дайками, и очистное пространство поддерживается на опорных целиках, а в массиве пород действует тектоническое поле напряжений с максимальной компонентой субгоризонтальной ориентации.

Первоначально коснемся геомеханической ситуации в покрывающей породной толще к началу отработки рудной залежи. В настоящее время является установленным фактом, что для Уральских месторождений горизонтальная компонента напряжений превышает вертикальную компоненту напряжений в два и более раз. При наличии на соответствующем месторождении пологопадающих надвиговых нарушений или наклонных слоевых контактов осадочных комплексов вся толща пребывает в квазиустойчивом состоянии, когда сдвиговые компоненты напряжений вдоль тектонических или природных контактов приближаются к компоненте напряжений, обеспечивающей сцепление по соответствующим контактам. Из такого устойчивого состояния блочный массив выходит при малейшем воздействии извне или при некоторых внутренних изменениях в среде. Например, в увлажненных областях массива устойчивость пологопадающих тектонических структур быстро нарушается с появлением локальной надвиговой подвижки в масштабе пологопадающего шва нарушения. В случае сдвиговых смещений вдоль слоистости в осадочном комплексе пород масштаб взаимного перемещения контактирующих структур окажется более значимым, и результаты подвижек на дневной поверхности будут более ощутимыми из-за протяженности контактов, хотя все основные перемещения блоков преимущественно происходят внутри массива.

Итак, многочисленными измерениями упомянутой лаборатории установлено, что абсолютно неподвижной или абсолютно устойчивой среды вблизи земной поверх-

ности не бывает. По слоистости или тектоническим зонам в глубине массива постоянно происходят сдвиговые перемещения. Результаты таких подвижек по дизъюнктивам или слоистости проявляются на дневной поверхности только после соответствующей фазы перемещения в подземных условиях [3]. Только смещения по тектоническим структурам в пределах месторождения до начала очистных работ проходят эпизодически в связи с соответствующими изменениями региональных полей напряжений. Чаще всего в таких перемещениях задействованы генеральные региональные структуры. Для Уральского региона это пологопадающие нарушения. Об этом свидетельствуют наблюдения за структурами автора на ряде Уральских рудных месторождений в шахтных условиях и на карьерах.

При создании протяженного по простиранию и падению залежи очистного пространства с поддержанием кровли на соответствующих по размерам опорных рудных целиках больших изменений в геологической среде покрывающей толщи вроде бы не должно происходить, так как все изменения в напряженном состоянии подработанной толщи локализуются на небольшом удалении от очистной камеры. Вертикальную нагрузку от перераспределенного веса пород воспринимают рудные опорные и поддерживающие целики и передают ее в подстилающие породы. Однако с развитием очистного пространства нередки случаи разрушения этих опорных целиков от сдвиговых деформаций по контакту рудного тела с породами висячего или лежащего бока. Пока этот механизм разрушения опорных целиков изучен теоретически недостаточно полно, но он постоянно имеет место, что неоднократно наблюдалось автором этой работы в условиях шахт СУБРа и ЮУБРа.

После потери несущей способности рудных целиков на соответствующей площади подработки в подработанной толще возникает новое поле напряжений. Новое напряженное состояние надрудной толщи

с некоторого момента времени характеризуется высокой анизотропией поля напряжений. В этом новом геомеханическом состоянии подработанной толщи сдвиговые деформации происходят на участках по пологим и наклонным поверхностям ослаблений, где касательная компонента напряжений вследствие высокой анизотропии в напряжениях превосходит компоненту напряжений, отвечающую за сцепление по контакту шва дизъюнктива.

Первоначально перемещение с локальным разрушением приконтактных к шву областей проявляется у дизъюнктивов последней генерации в истории месторождения или у дизъюнктивов более ранних генераций, соответствующим образом ориентированных относительно максимальной и минимальной компонент поля напряжений. Как правило, трещины и нарушения ранней еще дорудной генерации залечены относительно прочными минералами (серпентинитом, плагиоклазитом, кварцем), поэтому для сдвиговых разрушений шва с указанным заполнителем необходимо высокое значение касательной компоненты напряжений в плоскости этого шва. Швы тектонически активных структур, к которым чаще всего относятся пологие нарушения, залечены слабыми минералами (гематит, серицит, магнетит, глинка), поэтому не требуют высоких касательных компонент поля напряжений вдоль соответствующего шва. Наиболее масштабные и ослабленные тектонические нарушения на рудных месторождениях обычно смещают рудную залежь, разделяя месторождение на участки, поэтому чаще всего они оказываются в периферийной части очистного пространства, откуда начинаются разрушения кровли камеры. Рассмотрим примеры деформаций массива для самых простых случаев залегания рудных тел.

Наиболее чувствительными из всех ориентировок ослаблений к старой начальной системе тектонических сил (до ведения очистной выемки) и новой трансформированной тензорной системе текто-

нического поля напряжений уже после создания очистного пространства являются пологопадающие дизъюнктивы. Являются наиболее чувствительными не только из-за их ориентировки в массиве, но и своих генетических особенностей, так как по их поверхностям тектонические подвижки за длительный геологический с момента возникновения месторождения случались период неоднократно. Вместе с тем, при наклонном положении максимальной компоненты напряжений на месторождении вследствие особенностей рельефа поверхности или положения крупных разломов наиболее чувствительными к подвижности становятся горизонтально залегающие структуры, в том числе и плоскости расланцевания, уподобляющиеся геологами плоскостям напластования. При локальном тектоническом акте или сдвиговом перемещении крыльев дизъюнктива образуются зоны сжатия и растяжения или квадрантное распределение деформаций, которое хорошо известно геофизикам, изучающим землетрясения. Из-за такого распределения деформаций при сдвигах в случае протяженных тектонических нарушений на дневной поверхности всегда оказываются два квадранта деформаций. Часть реперов будет показывать сжатие некой области массива, а другая часть в соседней области растяжение. То есть часть из них, относящаяся к лежащему крылу нарушения, будет двигаться вниз, а подвижные репера висячего крыла дизъюнктива будут воздыматься.

Наименее чувствительными к сдвиговым перемещениям в подработанном массиве являются крутопадающие тектонические нарушения, так как сдвиговая компонента напряжений вблизи швов таких структур минимальна, а удерживающая компонента напряжений максимальна по величине. Высказанные утверждения относятся к пологопадающим рудным залежам. При наклонном положении залежей направление чувствительности дизъюнктивов к сдвиговым смещениям изменяется. Здесь самыми чувствительными к

сдвиговым смещениям становятся крутопадающие дизъюнктивы, ориентированные вкрест максимальной тектонической компоненты напряжений, и также субгоризонтальные структуры, а слабо чувствительными - полого падающие тектонические нарушения.

Если, например, рудное тело залегаёт под углом  $30^\circ$ , и начальное тектоническое поле напряжений определяется коэффициентом анизотропии равным двум, то новые главные (максимальное и минимальное) компоненты напряжений на периферии окажутся равными  $1,25\gamma H$  и  $0,15\gamma H$  соответственно. Сдвиговая компонента напряжений для крутопадающего и пологопадающего дизъюнктива составит около  $0,55\gamma H$ , а компонента препятствующая сдвигу для крутопадающего – около  $0,5\gamma H$ , и  $0,52\gamma H$  для субгоризонтального дизъюнктивов. Для крутопадающей тектонической структуры удерживающая компонента напряжений имеет большее значение, чем ранее приведенное расчетное, из-за более прочного заполнителя шва нарушения. Сдвиговые перемещения могут начаться по обоим видам структур. Сдвиговое перемещение по пологому и крутопадающим нарушениям начнется на участке удаленном от обнажения на несколько метров (в зависимости от протяженности очистного пространства). Затем произойдет сдвиговое перемещение по крутопадающей структуре в периферийные части нарушения с выходом на очистное пространство и на дневную поверхность. После увлажнения шва дизъюнктива сдвиговая часть распространится и на дневной поверхности. Перемещение по сдвиговым структурам, обусловленное положительной разницей сдвиговой и удерживающей компонент напряжений, сопровождается положительной обратной связью в изменении поля напряжений и продолжается длительный период [4]. То есть любое начальное перемещение по дислокации постепенно расширяет сферу своего влияния на периферийные области и достигает границы этой дислокации. Если дислокации вы-

страиваются параллельно в массиве, то интенсивность процесса сдвижения возрастает.

Висячее крыло нарушения при взаимном перемещении крутопадающей и пологопадающей дизъюнктивной структуры давит на лежащее крыло нарушения, происходит изгиб толщи между шовной частью нарушения и поверхностью камеры. Изгиб кровли приводит к растягивающим напряжениям и деформациям, то есть к разрушению области массива, принадлежавшей этой области. Обрушение пород протекает дискретно и крупными блоками, о чем сообщается в работе [5]. В указанной статье речь идет об обрушениях кровли на шахте «Первомайская», где наблюдения за деформированием подработанной толшины было тщательно обставлено инструментально.

В центральной части очистного пространства в нависающей толще пород анизотропия начального поля напряжений не достигает таких высоких значений, как на периферии, поэтому сдвиговые перемещения по структурам крутого падения практически невозможны. Сдвиговые перемещения по слабонаклонным тектоническим дизъюнктивам вероятны только при слабом сцеплении по контактам шва нарушений, то есть в случае заполнения шва глиной, мелонитом или серицитом, а также если шов находится во влажном состоянии.

Итак, обрушение вмещающей подработанной толшины пород инициируется неупругим перемещением крыльев дизъюнктивов различного ранга с различными углами падения (преимущественно пологого), ориентированных вкрест максимальной компоненте поля напряжений. На первом этапе перемещение происходит по основной наиболее чувствительной структуре к ориентировке поля напряжений, а затем и по апофизным структурам меньшего ранга. Возможна деформация и в противоположном направлении от частных случаев к общей деформации. Вектора перемещений на поверхности при дли-

тельном интервале между наблюдениями будут иметь широкий спектр направлений. В связи с этим обстоятельством очень сложно судить об главных векторах перемещения, а следовательно и главных векторах действующих напряжений накануне обрушения.

Форма обрушения породной толщи при описанном механизме разрушения пород под действием сдвиговых напряжений окажется очень непредсказуемой, чаще всего эллиптически вытянутой в направлении вкрест действия главной компоненты напряжений. Наклон контура зоны обрушения в этом случае будет довольно крутым. Внутренние перемещения блочной среды в подавляющем большинстве случаев будут сосредоточенными, и будут соответствовать границам тектонической зоны. Амплитуда перемещений на удалении от дневной поверхности и на удалении от контура камеры является максимальным. После обрушения кровли до дневной поверхности произойдет трансформация поля напряжений по всей периферии контура обрушения. Вектора максимального главного напряжения для каждой области массива ориентируются вдоль линии контура. Концентрация максимальной компоненты напряжений окажется наиболее высокой на концах эллипса разрушения, и минимальной в наиболее широкой его части. Однако анизотропия поля напряжений окажется не связанной ни с самой узкой, ни с широкой частью эллипса провала. Высокая анизотропия нового поля напряжений будет приурочена к области массива, незначительно удаленного от устья эллипса. Новая анизотропия поля напряжений окажется неблагоприятной для всех тектонических структур, как пологого залегания, так и крутого падения с

азимутом простирания таких структур параллельно главным осям провального эллипса.

В новом геомеханическом состоянии массива сдвиговые деформации будут проходить в форме чистого сдвига, чистого надвига, а также в переходных формах. Ориентация векторов перемещений на дневной поверхности в таких случаях имеет разное направление в зависимости от типа сдвига или направления надвиговой подвижки по пологим дизъюнктивам. Наиболее устойчивым во времени окажется знак перемещения реперов относительно друг друга для одного и того же тектонического шва. Наиболее рельефно сдвиговые и надвиговые перемещения будут проявляться вблизи очистного пространства у его периферийной части, так как анизотропия напряжений в этой области массива наиболее резкая.

Таким образом, тектоническое поле напряжений в массиве пород рудных месторождений при неглубоком залегании рудных тел при выемке полезного ископаемого способствует концентрации максимальной компоненты напряжений и снижению уровня минимальной компоненты напряжений. Такое перераспределение поля напряжений в подработанной толще пород, включающей дизъюнктивы различных типов, приводит к повышению сдвигающей компоненты напряжений по структурам надвигового и сдвигового типа и снижению удерживающей сопряженные структуры массива в равновесии. Последующие за этим деформации массива имеют чисто тектонический аспект с квадрантным распределением деформаций поверхности, а также с элементами традиционного представления о разрушениях подработанной толщи в виде изгиба толщи.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саиурин А.Д. Сдвигание горных пород на рудниках черной металлургии – Екатеринбург: 1999. – 265 с

2. Кузнецов С.В. Общие закономерности и характерные особенности перераспределения напряжений в массивах горных пород при развитии

выработанного пространства.- ФТПРПИ , 1988, N 6, С. 18-31

3. *Косыгин Ю.А.* Тектоника – М: Недра, 1988, 462 с.

4. *Каган А.А.* Инженерно-геологическое прогнозирование. – М. Недра, 1984. -195 с.

5. *Определение деформаций налегающих пород на шахте «Первомайская»*/Рудаков М.Л, Царегородцев В.М., Влох Н.П., Зубков А.В., Сашурин А.Д, Ушков С.М.// Устойчивость бортов карьеров и горное давление. - М.: Недра, 1966. – С. 116 -120

### **Коротко об авторах**

*Ермаков Н.И.* – Институт горного дела УрО РАН.



© В.М. Серяков, 2005

УДК 622.831

***В.М. Серяков***

## **РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА С УЧЕТОМ ПОРЯДКА ОБРУШЕНИЯ РУДНЫХ БЛОКОВ**

Семинар № 3

**О**дним из методов определения напряженного состояния массива горных пород и его изменения в процессе отработки является математическое моделирование. Зачастую оно является единственным средством, позволяющим установить характер распределения полей напряжений в окрестности отработанного пространства, что определяет важность используемых при расчетах постановок задач механики горных пород и математических моделей. Многообразие моделей, большое число входных параметров, значительные границы изменения механических характеристик горных пород часто делают затруднительным анализ полученных результатов, не позволяют четко выделить главные особенности дефор-

мирования массива. Эти обстоятельства говорят о том, что при математическом моделировании необходимо установить главные факторы, которые оказывают определяющее влияние на напряженно-деформированное состояние обрабатываемого массива горных пород.

Для условий выемки рудных месторождений вполне приемлема модель упругого тела, так как составляющие массива горные породы представляют собой прочные материалы, подчиняющиеся закону Гука вплоть до разрушения. Основными факторами, определяющими напряженное состояние массива, будут применяемая на месторождении технология отработки и последовательность образования очистных пространств. В

случае использования технологических схем с закладкой отработанного пространства твердеющими смесями разработки постановки [1, 2] и методы решения краевых задач геомеханики, позволяющие учитывать особенности процесса выемки и последовательность ведения очистных работ [3]. При применении систем с обрушением руды и налегающих пород учет последовательности отработки вызывает определенные трудности, связанные с формулировкой корректной постановки краевой задачи, отражающей основные особенности технологического процесса. После погашения блока, разрушенные породы в его объеме не приводят к полному освобождению границ от нормальных и касательных усилий. При дальнейшем выпуске руды отработанное пространство заполняется обрушенными породами, которые также оказывают давление на границы блока. Последующая отбойка руды приводит к тому, что обрушенные породы в объеме отработанного блока оказывают влияние на деформирование обрушенных пород, аналогичное закладочному.

Одна из постановок краевой задачи механики горных пород, учитывающая такие особенности процесса отработки, была предложена в [4]. Отметим ее основные положения. На первом этапе отработки с помощью метода начальных напряжений во всем объеме первого обрушенного блока устанавливается уровень напряжений, определяемый весом налегающих обрушенных пород. Механические свойства элементов, моделирующих породы блока, соответствуют рудному телу. На следующем этапе расчета заданный уровень напряжений устанавливается во всем объеме второго блока. Механические свойства среды, расположенной в отработанном пространстве первого блока, на втором этапе меняются и выбираются таким образом, чтобы они отражали характер деформирования обрушенных пород.

Указанный подход был применен при решении ряда практических задач и показал возможность удовлетворительного описания механических процессов, происходящих во вмещающих породах и рудном теле [5]. Недостатком же разработанного алгоритма перестройка и обращение матрицы жесткости на каждом этапе расчета. В этой ситуации актуальной практической и научной задачей является создание такого алгоритма, в котором для расчета напряженного состояния пород с учетом порядка обрушения рудных блоков, использовалась бы одна и та же матрица жесткости системы, отвечающая исходному напряженному состоянию массива.

В случае отработки с применением закладочного материала такая задача была решена в [6]. Итерационный процесс здесь строится следующим образом. Формируется матрица жесткости, соответствующая исходному массиву, не содержащему выработанных пространств. На первом этапе расчета с помощью метода начальных напряжений моделируется образование первой выработки (свободного пространства). Далее считается, что оно заполняется закладочным материалом. Метод начальных напряжений применяется и для моделирования условий образования выработки, формируемой на втором этапе расчета. Деформации  $\epsilon_{ij}$  в конечных элементах, моделирующих закладочный массив, рассчитываются с помощью неизменяемой матрицей жесткости, считаются истинными. Определяются напряжения  $\sigma_{ij}^*$ , которые должны бы действовать в этих элементах, если бы они имели механические свойства закладочного материала.

$$\sigma_{ij}^* = \lambda_1 \epsilon_{ij} + 2\mu_1 \epsilon_{ij}, i, j = 1, 2, 3,$$

здесь  $\lambda_1$ ,  $\mu_1$  – константы Ламе закладочного материала,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера,  $\epsilon = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$  – объемная деформация

Разность  $\sigma_{ij}^*$  напряжений  $\sigma_{ij}$ , полученных с помощью исходной матрицы

жесткости, рассматривается как начальные напряжения и далее обычным образом применяется процедура метода начальных напряжений. Итерационный процесс в элементах, моделирующих свободное пространство, образованное на первом этапе расчета, продолжается до тех пор, пока два последующих приближения не станут отличаться на заданную малую величину. Таким образом, итерационный процесс метода начальных напряжений используется как для моделирования условий образования второй выработка, так и для установления напряжений в элементах первой выработки, отвечающих закладочному материалу. Далее описанный алгоритм применяется для моделирования образования третьей, четвертой и т. д. выработок.

Идеи, использованные при построении этого алгоритма, предполагается применить и для расчета напряженного состояния массива горных пород при отработке месторождений с обрушением руды и налегающих пород.

Основные особенности разработанного подхода состоят в следующем:

1. На первом этапе расчета устанавливается заданный уровень напряжений в конечных элементах, расположенных в первом обрушенном рудном блоке. Результат расчета напряженного состояния для всей области моделирования сохраняется во внешней памяти ЭВМ.

2. На втором этапе расчета заданный уровень напряжений устанавливается во втором обрушенном блоке. Для этого используется процедура метода начальных напряжений. Он же применяется и для расчета дополнительных напряжений, возникающих в объеме первого обрушенного блока. Начальные напряжения здесь определяются таким же образом, как и при моделировании технологии с закладкой отработанного про-

странства. После того как итерационный процесс на втором этапе расчета завершится, к дополнительным напряжениям, полученным в объеме первого обрушенного блока, добавляются их значения, сохраненные во внешней памяти ЭВМ. Затем полученные поля напряжений в элементах, расположенных в объемах первого и второго обрушенных блоков, снова записываются во внешнюю память ЭВМ.

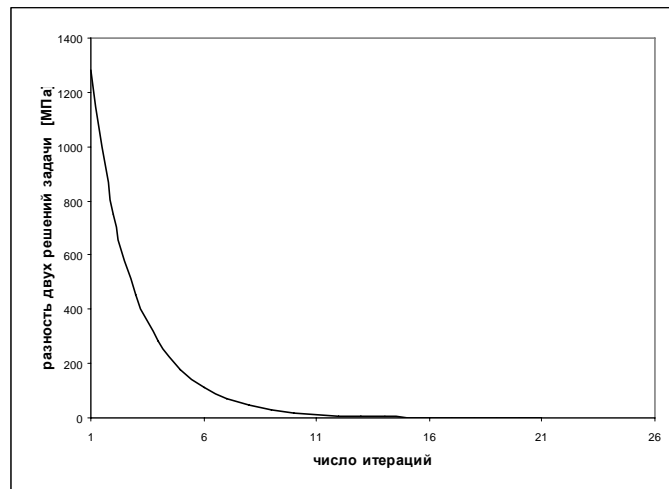
3. На третьем этапе расчета с помощью метода начальных напряжений устанавливается заданный уровень напряжений в конечных элементах третьего обрабатываемого блока. В объеме первого и второго блоков этим же методом определяются дополнительные напряжения, вызванные обработкой третьего блока. После окончания итерационного процесса к полученным напряжениям в элементах первого и второго блоков добавляются соответствующие их значения, помещенные во внешнюю память ЭВМ.

4. На последующих этапах расчета описанный выше алгоритм повторяется необходимое число раз.

Сравнивая последовательность расчета напряженного состояния массива горных пород в случаях отработки запасов полезных ископаемых с закладкой отработанного пространства и с обрушением руды и налегающих пород, следует отметить их почти полное совпадение. Разница заключается лишь в том, что при моделировании последовательности отработки с обрушением в элементах, расположенных в объемах обрушаемых блоков итерационный процесс определяет лишь дополнительные напряжения. Для получения здесь полных напряжений необходимо суммирование дополнительных и сформированных до отработки очередного блока напряжений, хранящихся во внешней памяти ЭВМ.

На основе построенного алгоритма был разработан комплекс программ, использующий при расчетах напряженно-деформированного состояния породного массива с учетом последовательности обрушения рудных блоков постоянную матрицу жесткости. Для проверки работоспособности и эффективности алгоритма был проведен расчет одной и той же задачи двумя способами: а) с реализацией постановки, изложенной в [4], где механические свойства обрушенной руды в объемах взорванных и отработанных блоков изменяются; б) с помощью подхода, использующего постоянную матрицу жесткости.

Тестовая задача представляла собой расчет напряженного состояния массива для двух этапов отработки, представляющих отбойку двух рудных блоков. Расчет первого этапа для обоих способов моделирования осуществляется одним и тем же образом. На втором этапе в подходе а) матрица жесткости изменяется, а в подходе б) остается постоянной. На рисунке приведен график, представляющий изменение суммы разности двух решений в каждой точке расчетной области в зависимости от числа итераций



метода начальных напряжений. Видно, что разность решений достаточно быстро стремится к нулю, что говорит об идентичности используемых подходов. Вместе с тем использование подхода с неизменной матрицей жесткости позволяет в два раза уменьшить время расчета рассмотренной задачи. В случае моделирования большего числа этапов отработки эта разница будет пропорционально возрастать.

Таким образом, для учета последовательности отработки рудных блоков предложен и реализован алгоритм, использующий на всех этапах расчета неизменяемую матрицу жесткости системы и позволяющий просто и быстро проводить расчеты напряженного состояния породного массива.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов С.В., Одинцев В.Н., Слоим М.Э., Трофимов В.А. Методология расчета горного давления. – М: Наука, 1981.
2. Баймбетов М.О., Серяков В.М. Влияние порядка ведения очистных и закладочных работ на напряженно-деформированное состояние месторождений. // ФТПРПИ, 1984, № 4.
3. Серяков В.М. Об одном подходе к расчету напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности выработанного пространства. // ФТПРПИ, 1997, № 2.

4. Серяков В.М. Влияние порядка отработки месторождения на процесс перераспределения напряжений в массиве горных пород. // Геодинамика и напряженное состояние недр. Труды международной конференции 4–7 октября 1999 г. Новосибирск, 1999.
5. Еременко А.А., Серяков В.М. Геомеханическое обоснование порядка отработки сближенных участков Шерегешевского месторождения. // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли.

Труды международной конференции 6–9 октября 2003 г. Новосибирск, 2004.

6. *Серяков В.М.* Расчет напряженного состояния горных пород с учетом последовательности

возведения закладочного массива. // ФТПРПИ, 2001, № 5.

### **Коротко об авторах**

*Серяков В.М.* – доктор технических наук, профессор, ИГД СО РАН.



© **И.И. Мартыненко, И.А. Мартыненко, Ж.А. Минакова 2005**

УДК 622.28

***И.И. Мартыненко, И.А. Мартыненко, Ж.А. Минакова***

## ***ВЛИЯНИЕ ЗАПОЛНЕНИЯ ЗАКРЕПНОГО ПРОСТРАНСТВА НА РАБОТУ КРЕПИ***

Семинар № 3

**А**налитические исследования [1, 2, 3] показали, что незаполненные пустоты в своде выработок снижают несущую способность крепи в 2,0–2,5 раза за счет увеличенных изгибающих моментов в криволинейной части арок, неравномерности распределения нагрузки по их периметру, возможности смещения рам к одному из боков или вдоль выработки.

Этот вывод подтвержден стендовыми [4] и шахтными [4] исследованиями. Анализ результатов инструментальных наблюдений, произведенных в выработках шахт Центрального Донбасса, показал, что ни в одном случае не было отмечено соответствия фактической несущей способности арочной крепи и паспортной (технической), а отношение фактической несущей способности к паспортной (коэффициент

работоспособности крепи  $K_p$ ) изменяется в пределах 0,2–0,8. При этом величина  $K_p$  зависит от условий самозабучивания пустот в своде.

Шахтными наблюдениями установлено, что оставленные при проходке незаполненными закрепные пустоты в своде выработок хотя и уменьшаются в размере с течением времени, однако имеют место даже на сопряжении с 1-й лавой. При так называемом самозаполнении закрепного пространства отслоившейся породой этот процесс заканчивается только на линии очистного забоя. Следовательно, в достаточно широком диапазоне горно-геологических и горнотехнических условий основная крепь и крепь усиления практически не взаимодействуют с вмещающими горные выработки массивами

пород как в 1-ом, так и во 2-ом периодах поддержания (по классификации ВНИИ-МИ).

Таким образом, наличие незаполненных пустот за верхняками рам металлической крепи является причиной неудовлетворительного управления горным давлением в выработках.

В отечественной практике крепления получил распространение способ заполнения закрепного пространства в своде проводимых выработок выкладкой деревянных костров. Такое заполнение не исключает возможности динамического нагружения крепи при обрушении надбермовых пород кровли, смещения рам к одному из боков выработки или вдоль ее продольной оси. При опускании кровли арочная крепь полностью вступает в работу лишь после уменьшения первоначальной высоты костров более чем на половину, к тому же применение горючих материалов для заполнения пустот за огнестойкой крепью запрещено Правилами безопасности.

Исходя из этого, все пустоты по периметру арочной крепи должны заполняться шахтной породой или твердеющим материалом. Это требование отраслевых инструктивных документов и Правил безопасности.

Вопрос о влиянии заполнения породой пустот за крепью на ее работу достаточно подробно изучен. Установлено, что тщательная забутовка мелкими кусками породы (размеры кусков – до 0,15 м) исключает динамические нагрузки и способствует более равномерному их распределению по периметру рам. При этом чем плотнее забутовка, тем равномернее по контуру крепи распределяется внешняя нагрузка. Увеличение жесткости забутовки приводит к уменьшению изгибающих моментов в элементах крепи.

Ручная забутовка выполняется на участке породного обнажения выработок, следовательно, небезопасна и требует много времени и труда, в том числе на сортировку и перекидку породы. Ее трудоемкость составляет до 65 % от процесса

крепления. При этом наиболее сложно заполнение пустот в своде, составляющее 55–65 % от трудозатрат на полную забутовку, к тому же качественно забутить закрепное пространство над верхняками рам невозможно, из – за чего возникают сосредоточенные нагрузки, самым неблагоприятным образом сказывающиеся на работе крепи, поэтому заполнение пустот в своде шахтной породой вручную противоречит практике арочного крепления выработок как в странах бывшего СССР [2, 3], так и за рубежом [5].

Попытки механизировать заполнение закрепное пространство шахтной породой были осуществлены ВНИИОМШСом. Институтом разработаны и испытаны на стенде и в производственных условиях забутовочные машины МЗ – 3, МЗ – 6 и забутовочный комплекс ЗК – 1. Машина МЗ – 6 производит не только пневмоукладку материала, но и измельчение крупных кусков пород до фракции 0,05 м. Это является условием осуществления пневмотранспорта по трубопроводу диаметром 100 мм. Установлено, что потребность в забутовочном материале с максимальным размером кусков до 0,5 диаметра трубопровода может быть также удовлетворена путем рассева рядовой породы от проведения выработок. Испытания технологии заполнения закрепного пространства шахтной породой с помощью забутовочных машин, проведенные, в том числе на шахтах Российского Донбасса, показали: улучшение качества забутовочного слоя благодаря поступлению материала труднодоступные места с необходимым его уплотнением; создание безопасных условий труда проходчиков; снижение в два раза трудоемкости работ.

Однако породное заполнение имеет низкое сопротивление сжатию в начальный период нагружения, что подтверждено шахтными и лабораторными исследованиями. Оно не обеспечивает связи породного контура и крепи, т.е. наблюдается второй вид контактных условий по классификации Л.А. Джапаридзе. Оно не

сглаживает неровности породного контура, характерные для буровзрывной проходки, являющиеся концентраторами напряжений (коэффициент концентрации в зависимости от амплитуды неровности составляет 2,0–4,5). Забутовочный слой не является грузонесущей оболочкой ввиду отсутствия плотного прилегания отдельных кусков породы друг к другу. Заполнение пустот породой лишь незначительно повышает устойчивость горных выработок с арочной крепью. Учитывая все это, предложенная ВНИИОМШСом технология забутовочных работ, требующая размещения в стесненных условиях призабойной зоны дополнительного оборудования и обеспечения его пневмоэнергией, не получила распространения.

Значительно больший технический эффект достигается при заполнении пустот за арочной крепью твердеющим материалом (ТМ). Использование ТМ позволяет ускорить введение крепи в работу, так как его сжимаемость во много раз меньше, чем породной забутовки. За счет адгезионной связи ТМ с породой исключается дополнительная пригрузка рам его весом и повышается прочность на изгиб приконтурных слоев кровли. Оболочка твердеющего материала сглаживает неровности породного контура и ограждает массив от выветривания. Она равномерно распределяет нагрузку по периметру рамы, снижает изгибающие моменты в элементах крепи и выполняет грузонесущие функции.

Для заполнения закрепного пространства выработок на шахтах Германии применяют твердеющие материалы, как с быстрым нарастанием прочности, так и с медленным [6]. Выбор типа твердеющего материала производится с учетом требований геомеханики. Если выработка проводится по устойчивым породам и расслоение ее кровли начинается не вблизи проходческого забоя, то возможно применение медленнотвер-

деющих материалов, в противном случае используют быстротвердеющие смеси. ТМ с быстрым нарастанием прочности должен обладать прочностью при сжатии не менее 5 МПа через 5 ч, не менее 10 МПа через 12 ч и окончательным не менее 20 МПа [5]. От ТМ с медленным нарастанием прочности требуется суточная прочность при сжатии 5 МПа и 20 МПа через 28 суток [6]. Все выпускаемые фирмами Германии зернистые строительные смеси, состоящие преимущественно из ангидрида, отвечающие требованиям, предъявляемым к быстротвердеющим материалам, а порошкообразные, состоящие, как правило, из цемента и золы – требованиям, предъявляемым к медленнотвердеющим материалам. Кроме этого, в качестве твердеющего материала для заполнения закрепного пространства выработок может применяться легкий строительный пенораствор и пенопласт «изошаум». Однако, как показали шахтные исследования недостаточная прочность материала заполнения, например, пенопласта «изошаум» (прочность образца при одноосном сжатии через 28 суток составляет 0,04 МПа) способствует росту конечных смещений вмещающих горные выработки пород в сравнении с самозабучиванием. Легкий строительный пенораствор на минеральной основе позволяет сократить расход строительных смесей при приемлемом сопротивлении сжатию, изменяющемся от 1–4 МПа при плотности раствора 0,8 т/м<sup>3</sup> (объем пор 60 %) до 10 – 24 МПа – при плотности раствора 1,4 т/м<sup>3</sup> (объем пор 30 %). Разработанные в настоящее время установки для приготовления легкого пенораствора не отвечают требованиям, предъявляемым к оборудованию, эксплуатируемому в подземных условиях. Поэтому легкие строительные растворы редко используются для заполнения закрепного пространства выработок.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Джапаридзе Л.А., Кашивили С.М.* Оценка напряженного – деформированного состояния арочной крепи при наличии закрепной пустоты в своде//Горное давление и крепление горных выработок. – Тбилиси: Мецниереба, 1977. – Вып.3. – с.5 – 14.

2. *Колоков С.Б.* О влиянии качества установки металлической арочной крепи на условия ее работы//Шахтное строительство. – 1987. – С. 14–16.

3. *Максимов А.П., Шашенко А.Н., Рожко А.Н.* Влияние качества забутовки на несущую способ-

ность металлической арочной крепи//Шахтное строительство. – 1987. – С. 21–23.

4. *Ерофеев Л.М., Мирошникова Л.А.* Повышение надежности крепи горных выработок. – М.: Недра, 1988. – 245 с.

5. *Якоби О.* Практика управления горным давлением. Пер. с нем. – М.: Недра, 1987. – 566 с.

6. *Тин П.* Состав, транспортировка и опыт применения строительных смесей для подземных горных работ//Глюкауф. – 1992. – 10/12. – С. 30–37.

### **Коротко об авторах**

*Мартыненко И.И., Мартыненко И.А., Минакова Ж.А.* – Шахтинский ин-т филиал Южно-российского государственного технического университета (НПИ), Шахты.

---

**ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ  
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**РУКОПИСИ,**

1. Дремов В.И., Никитенко Е.А., Мокроусов Б.А. Роль противопылевых респираторов в формировании пылевой нагрузки на органы дыхания (№ 404/08-05 — 02.03.05) 2 с.
2. Руденко В.В., Тюрин В.А. Стоимостная оценка полоты и качества извлечения запасов флюоритовых руд при их подземной разработке (№ 405/08-05 — 03.03.05) 12 с.

---

© **В.А. Асанов, В.Н. Токсаров,  
В.В. Аникин, 2005**

УДК 622.02:531

**В.А. Асанов, В.Н. Токсаров, В.В. Аникин**

### **ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫХ РИФОВЫХ СТРУКТУР НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЛЯНЫХ ПОРОД\***

**Семинар №3**

**О** беспечение безопасной эксплуатации рудников Верхнекамского калийного месторождения в значительной степени определяется наличием достоверной информации о строении и свойствах соляной толщи и вмещающих пород.

Анализ результатов исследования физико-механических свойств соляных пород показывает, что, несмотря на однотипность состава основных их разновидностей, латеральная изменчивость механических показателей варьируется в ши-

роких пределах и может отличаться в 4-5 раз от средних значений. Такой разброс параметров во многом обусловлен изменчивостью состава, структуры, текстуры и степени дефектности образцов, присущих горным породам по природе их образования. Кроме того, их изменчивость связана с особенностями геологического строения массива. В последние годы особое внимание уделяется выявлению и оконтуриванию аномальных зон в строении горного массива.

Наиболее часто встречающимися неоднородностями строения подстилающих соляную толщу пород в пределах месторождения являются рифогенные постройки, залегающие на глубине 1500–2500 м в осадочных породах подсоляного ложа.

Исследованиями установлено, что над периферийными частями рифов в соляной толще часто наблюдаются участки геологических осложнений различного рода [1], развиваются кольцевые зоны повышенных напряжений [2] и трещиноватости [3]. В процессе ведения горных работ вблизи таких зон часто наблюдается снижение устойчивости выработок, более интенсивное разрушение целиков, осложнение при бурении скважин и ряд других явлений, сви-

детельствующих об изменении механических свойств пород. Однако каких-либо количественных или даже качественных взаимосвязей до сих пор не было установлено. Это объясняется, с одной стороны, отсутствием планомерных исследований в этом направлении, а, с другой, - необходимостью накопления значительного объема статистического материала.

Оценка влияния глубинных рифовых построек на механические свойства соляных пород выполнена на основе опытно-методических работ, проведенных Горным институтом совместно с ОАО «Уралкалий» на площади Юрчукского месторождения нефти вблизи южной границы 2-го Соликамского рудника (рис. 1). Скважины бурились в окрестности рифогенных построек пермского и девонского возраста: на склоне рифа (скв.1098), в его периферийной зоне (скв.1095) и вне зоны его влияния (скв.1096). Исследование физико-механических свойств соляных пород выполнялось по стандартным методикам [4, 5] на цилиндрических образцах диаметром – 85-110 мм с отношением высоты ( $h$ ) к диаметру ( $d$ ), равном 1,0, изготавливаемых из kernового материала.

---

\*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-05-96031) и Интеграционного проекта УрО РАН № 05-11-04.

Таблица 1  
Механические свойства соляных пород

Интервал разреза, порода	№ скв.	Показатели							
		$\sigma_{сж}$ , МПа	$\varepsilon_p$ , %	$D_{пр.}$ , ГПа	$\sigma_y$ , МПа	$D_y$ , ГПа	$E$ , ГПа	$K_{Ic}$	$K_{nn}$
ПКС, кс	1096	30,4	7,80	0,49	15,4	1,06	3,64	0,42	0,41
	1095	26,5	5,47	0,71	13,4	1,54	4,97	0,39	0,35
	1098	26,7	4,17	0,81	13,9	2,43	3,97	-	0,66
КЗ, кс	1096	27,6	6,36	0,55	15,0	1,22	2,97	0,40	0,70
	1095	24,3	5,52	0,55	13,9	1,26	3,54	0,39	0,56
	1098	26,2	4,60	0,74	12,0	2,24	3,85	0,35	0,79
СЗ, кс	1096	27,1	6,11	0,57	14,8	1,14	2,88	0,37	0,59
	1095	27,2	5,71	0,62	13,8	1,29	3,60	0,32	0,49
	1098	24,4	5,03	0,63	10,7	1,34	3,20	0,30	0,62
СЗ, скр	1096	28,0	7,71	0,45	13,0	1,18	2,81	0,35	0,60
	1095	25,6	6,93	0,50	11,0	1,05	2,58	0,30	0,52
	1098	24,8	6,09	0,51	8,9	0,99	1,81	0,20	0,76

Таблица 2  
Относительное изменение механических свойств соляных пород  
в зоне влияния рифа

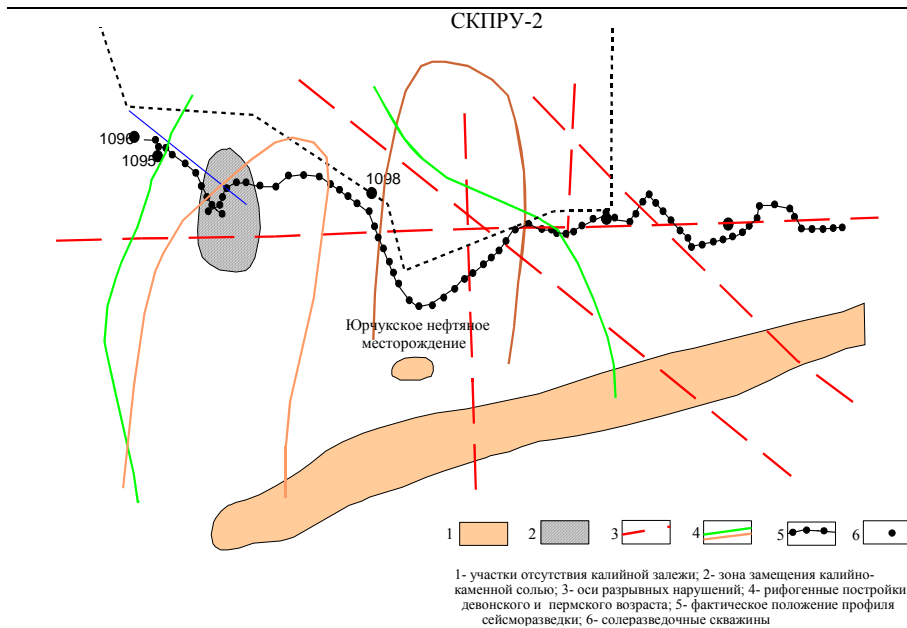
Интервалы разреза, порода	Параметры, %					
	$\sigma_{сж}$	$\varepsilon_p$	$D_{пр.}$	$E$	$K_{Ic}$	$K_{nn}^*$
ПКС, к.с	-12,5	-38,2	+55,1	+22,8	-7,1*	37,8
КЗ, к.с.	-8,6	-20,5	+17,3	+24,9	-7,5	20,3
СЗ, к.с	-6,5	-11,0	+7,8	+18,7	-16,8	13,7
СЗ, скр.	-10,0	-23,5	+12,2	-21,9	-31,5	20,0
Ср. знач.	-9,4	-23,3	+23,1	+22,1	-15,7	23,0

\*Среднее значение, подсчитанное по абсолютным величинам

В процессе испытаний определялся комплекс прочностных и деформационных параметров, включающий:  $\sigma_{сж}$  - предел прочности на одноосное сжатие, МПа;  $\sigma_y$  - предел упругости, МПа;  $\varepsilon_{пр}$  - относительная продольная деформация, соответствующая пределу прочности (разрушающая деформация), %;  $D_{пр.}$  - модуль деформации (секущий) на пределе прочности, ГПа;  $D_y$  - модуль деформации (касательный) на пределе упругости, ГПа;  $E$  - модуль упругости, определенный по разгрузочной ветви диаграммы деформирования, ГПа;  $K_{Ic}$  - коэффициент трещиностойко-

сти, Па·м<sup>1/2</sup>;  $K_{nn} = \varepsilon_{упр}/\varepsilon_{ост}$ . Сопоставление результатов производилось по осредненным данным механических свойств каменной соли (кс) для трех интервалов, выделяемых в разрезе соляной толщи (табл. 1): покровная каменная соль (ПКС), карналлитовая зона (КЗ), сильвинитовая зона (СЗ). В табл. 1 также приведены результаты исследования механических свойств красного сильвинита (скр) сильвинитовой зоны.

Анализ результатов показал, что интенсивность изменения прочностных и деформационных параметров соляных по-



род различна как по разрезу, так и по латерали:

- во всех скважинах и на всех интервалах наблюдается тенденция к росту показателя трещиностойкости и модуля упругости каменной соли;
- для скважин №№ 1096, 1098 характерна тенденция к увеличению среднего значения предела прочности при одноосном сжатии и предела упругости для каменной соли по всем рассматриваемым интервалам;
- в скважинах, пройденных над рифовым массивом (№№ 1095, 1098), прослеживается тенденция к росту касательного модуля деформации каменной соли по всей соляной толще;
- у красных сильвинитов отмечается рост среднего значения разрушающей деформации и показателя пластичности при одновременном снижении модулей деформации (секущего) и упругости для всех скважин, а также касательного модуля деформации для двух скважин (кроме фоновой) по сравнению со средним значением аналогичных параметров для каменной соли СЗ.

#### *Положение участка проведения опытно-методических работ*

В табл. 2 показано среднее по интервалам разреза изменение механических параметров каменной соли для скважин, пройденных в аномальной зоне (скв. 1095 + 1098), по отношению к фоновым значениям (скв. № 1096).

Наименьшее снижение прочности каменной соли характерно для СЗ - (6,5 %), наибольшее - для ПКС (12,5 %). Максимальное снижение разрушающей деформации наблюдается для ПКС, минимальное - для каменной соли СЗ. В верхней части разреза соляной толщи установлено значительное возрастание деформационных показателей. Так, модуль упругости покровной каменной над рифом на 22,8 %, а секущий модуль деформации почти в полтора раза выше, чем в фоновой скважине.

Необходимо отметить, что в нижней части разреза соляной толщи значительно интенсивнее снижается коэффициент трещиностойкости (на 31,5 % по сравнению 7,1 % для каменной соли ПКС), что

свидетельствует о повышенной степени их дефектности.

Обращает на себя внимание характер изменения коэффициента пластичности, например: наибольшее изменение этого показателя в наблюдается для ПКС (37,8 %), при этом в периферийной части его средняя величина снижается на 14,6 %, а над сводовой частью рифа она возрастает на 61,0 % по сравнению с фоновым значением, что также свидетельствует о существенном влиянии рифогенных образований.

Наличие «ослабленного» участка в соляных породах над зоной рифов также подтверждается анализом данных бурения, геофизическими исследованиями и результатами изучения геологического строения участка. В скв. № 1095 выход керна при проходке пласта Б составил всего 21 %, в то время как среднее значение этого показателя в интервале разреза «подшва пл. Б – кровля пл. В» равно 67,6 %, при этом бурение скважины сопровождалось поглощением цемента и потерей бурового раствора, что однозначно свидетельствует о трещиноватости массива. Согласно геологическим исследованиям в

скв. №№ 1095, 1098 из разреза выпадает нижняя часть соляно-мергельной толщи, содержащая пласты каменной соли, что с большой степенью вероятности может быть обусловлено развитием зоны повышенной трещиноватости, наличие которой привело, в конечном итоге, к выщелачиванию этого горизонта. Согласно геофизическим исследованиям, в пределах разреза, соответствующего соляно-мергельной и карналлитовой зонам, в волновой картине наблюдается резкое фазовое смещение, интенсивное затухание, снижение скоростей на 200-300 м/с. Эти данные могут интерпретироваться как разрывное нарушение в надсоляной и соляной толщах [2].

Таким образом, жесткие включения в виде рифогенных построек, залегающие ниже соленосной толщи, оказывают существенное влияние на механические свойства и устойчивость соляных пород. При проектировании горных работ и мер охраны водозащитной толщи необходимо учитывать не только аномалии строения собственно соляной толщи, но и всего комплекса вмещающих пород.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирчинк М.Ф., Мкртчян О.М., Хатьянов Ф.И. и др. Рифы Урало-Поволжья, их роль в размещении залежей нефти и газа и методика поисков. – М., Недра, - 1994.
2. Барях А.А., Санфиоров И.А., Кудряшов А.И., Прийма Г.Ю. О влиянии рифогенных образований на структуру верхних этажей осадочного чехла // Докл. АН – 1998, том 363, № 3.
3. Gendzwill D.J., Stead D. Rock mass characterization around Saskatchewan potash mine opening

using geophysical techniques: a review. Canadian Geotechnical Journal, V.29, № 4, 1992.

4. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М., - 1984. – 10 с.

5. ГОСТ 28985-91 Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. – М., - 1991. – 19 с.

#### Коротко об авторах

Асанов В.А., Токсаров В.Н., Аникин В.В. – Горный институт УрО РАН, г. Пермь.

© М.С. Плешко, Д.В. Крошнев,  
2005

*М.С. Плешко, Д.В. Крошнев*

**ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ  
«АРМИРОВКА – КРЕПЬ – ПОРОДНЫЙ МАССИВ»  
В ГЛУБОКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛАХ**

Семинар № 3

Отмечены особенности проектирования крепи вертикальных стволов. Обоснована необходимость исследования совместной работы системы «армировка – крепь – массив». Разработаны и исследованы конечно-элементные модели ствола. Представлены полученные результаты расчета моделей и сделаны выводы о напряженно-деформированном состоянии крепи в месте крепления армировки. Намечены цели дальнейших исследований.

Глубина разработки месторождений полезных ископаемых в России и за рубежом в настоящее время достигает 2500–3000 м и продолжают увеличиваться. Их вскрытие осуществляется вертикальными стволами различного диаметра, сооружаемыми, как правило, в сложных горно-геологических условиях.

Глубокий вертикальный ствол представляет собой сложное, во многом уникальное подземное сооружение, основными конструктивными частями которого является крепь, препятствующая смещению и обрушению пород в выработку, и армировка, обеспечивающая направленное движение по стволу подъемных сосудов различного типа.

Наиболее распространенный вид крепи вертикальных стволов – монолитный бетон, а для армирования чаще применяют жесткую металлическую армировку, несущие элементы которой (расстрелы, консоли, кронштейны и др.) непосредственно закреплены в стенках ствола.

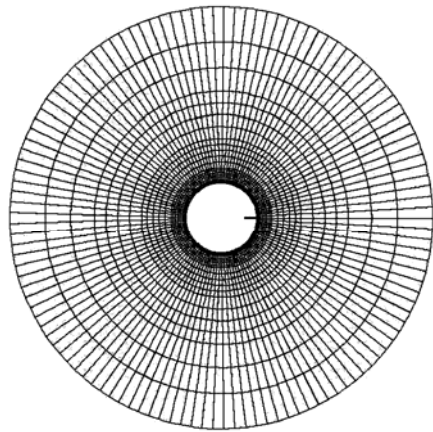
Современные методы проектирования крепи базируются на исследовании совме-

стного взаимодействия крепи с массивом, при этом рассматривается расчетная континуальная схема контактного взаимодействия крепи с деформирующимся массивом, включающая в себя среду с отверстием, моделирующую массив пород, и кольцо заданного диаметра и толщины, моделирующее крепь выработки.

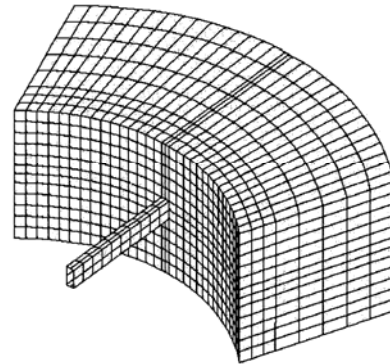
Проектирование параметров крепи в месте крепления несущих элементов армировки осуществляется аналогично другим участкам ствола, динамические нагрузки, передаваемые на крепь от движущихся подъемных сосудов, при расчете не учитываются.

Из известных способов крепления расстрелов наибольшее распространение получил способ заделки их в лунки бетонированием. Вследствие некачественного ведения работ свойства бетона в месте заделки лунок, как правило, хуже, чем у бетона крепи. Разработка и последующее бетонирование лунок приводит к возникновению в крепи вокруг расстрела дополнительных плоскостей ослабления и концентраций напряжений. Эти факторы способствуют постепенному расшатыванию расстрела в узле крепления в процессе эксплуатации ствола и разрушению бетона в лунке.

По мере роста глубины стволов, условия совместной работы крепи и армировки все более ухудшаются, и для обеспечения их безаварийной работы необходимо исследование взаимно влияющей системы «армировка – крепь – породный массив».



а)



б)

**Рис. 1. Объемная конечно-элементная модель ствола:** а) – вид сверху; б) – фрагмент схемы в месте крепления консоли

В настоящее время с появлением мощных программных комплексов для проектирования конструкций моделирование работы такой системы становится возможным.

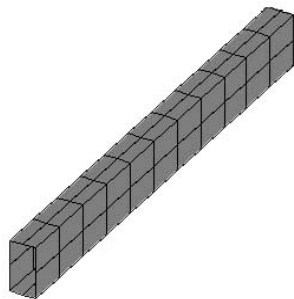
Авторами на базе программного комплекса Лира 9.0 были разработаны и исследованы пространственные конечно-элементные модели ствола с армировкой (рис. 1). Модели представляли собой участок ствола протяженностью 40 м и диаметром 6 м, включающий крепь ствола толщиной 300 мм и консольные несущие элементы армировки длиной 1 м, установленные с шагом 4 м. Ствол помещен в породный массив, внешний диаметр которого равен шести диаметрам ствола.

Крепь и породный массив состоят из упругих объемных конечных элементов (КЭ), жесткость которых была принята равной соответственно бетону класса В25 и песчанику средней крепости. Консоли армировки включают в себя КЭ типа изгибаемых пластин толщиной 10 мм.

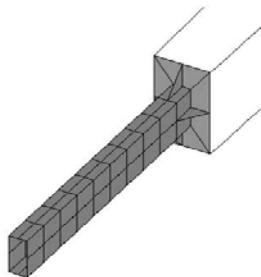
Для проведения сравнения были разработаны конечно-элементные модели для двух вариантов крепления консолей: бетонированием в лунках и закреплением анкерами (рис. 2).

На концы консолей, выступающих в ствол, прикладывались лобовая и боковая динамические нагрузки различной величины, породный массив загружался объемным давлением, рассчитанным для глубины залегания ствола 1000 м.

Задачей исследований была оценка напряженно-деформированного состояния крепи вокруг узла крепления армировки при совместном действии динамических нагрузок на арми-



а)



б)

ровку и горного давления массива пород.

**Рис. 2 Конечно-элементные модели консолей:** а) – при бетонировании в лунках; б) – при креплении на анкерах

Таблица 1

*Значения напряжений в крепи ствола на участке контакта с армировкой при действии динамических нагрузок на армировку*

Величина нагрузок, кН	Значения напряжений, МПа								
	$N_x$	$N_y$	$N_z$	$T_{xy}$	$T_{xz}$	$T_{yz}$	$N_1$	$N_2$	$N_3$
50	-1,1	-7,2	-1,9	-0,9	1,2	-4,0	1,2	-2,0	-9,3
60	-1,3	-8,6	-2,3	-1,1	1,4	-4,8	1,4	-2,5	-11,2
70	-1,6	-10,0	-2,7	-1,3	1,6	-5,7	1,7	-2,9	-13,1
80	-1,8	-11,4	-3,1	-1,5	1,8	-6,5	1,9	-3,3	-14,9
90	-2,0	-12,8	-3,5	-1,6	2,1	-7,2	2,1	-3,7	-16,8
100	-2,2	-14,3	-3,9	-1,8	2,3	-8,0	2,4	-4,1	-18,7

Таблица 2

*Значения напряжений в крепи ствола на участке контакта с армировкой при совместном действии нагрузок*

Величина нагрузок, кН	Значения напряжений, МПа								
	$N_x^*$	$N_y$	$N_z$	$T_{xy}$	$T_{xz}$	$T_{yz}$	$N_1$	$N_2$	$N_3$
50	-25,5	-6,8	-5,2	-1,1	2,1	-4,0	-1,7	-10,1	-25,8
60	-25,7	-8,2	-5,6	-1,3	2,4	-4,8	-1,7	-11,9	-26,0
70	-25,9	-9,6	-6,0	-1,5	2,6	-5,6	-1,6	-13,7	-26,3
80	-26,2	-11,1	-6,4	-1,7	2,8	-6,4	-1,5	-15,6	-26,6
90	-26,4	-13,5	-6,8	-1,9	3,1	-7,2	-1,4	-17,4	-26,9
100	-26,6	-14,0	-7,2	-2,0	3,3	-8,0	-1,3	-19,3	-27,2

\*Примечание:  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_z$  – нормальные напряжения относительно соответствующих осей,  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$  – касательные напряжения,  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  – главные напряжения.

На первом этапе исследовалась модель с закреплением армировки в лунках. В результате расчета модели были получены значения всех составляющих объемного напряженно-деформированного состояния в крепи и определены главные напряжения.

В табл. 1 и 2 приведены значения напряжений в крепи на участке контакта с консолью, при действии только динамических нагрузок на консоль, и совместном действии динамических нагрузок и горного давления.

Анализ полученных данных показывает, что при действии на крепь ствола только динамических нагрузок, передаваемых консолью, при большой величине нагрузок главные напряжения в крепи на участке контакта с армировкой выше расчетно-

го сопротивления бетона на сжатие (для бетона В25  $R_6=14,5$  МПа).

При совместном действии горного давления и динамических нагрузок расчетные напряжения в крепи больше предела прочности бетона на сжатие. Для возможности нормальной эксплуатации крепи на этом участке необходимо значительное увеличение толщины крепи или использования бетона более высоких марок.

Более эффективным решением, позволяющим уменьшить нагрузки на бетон узла крепления, является крепление консоли на анкерах. Исследования соответствующей конечно-элементной модели показали, что напряжения в бетоне крепи, на участке контакта с анкером, ниже соответствующих значений напряжений в крепи при заделке консоли в лунке на 34–37 %.

Таким образом, в глубоких стволах с подъемом большой производительности как основной способ крепления элементов армировки к крепи ствола должен быть рекомендован способ крепления расстрелов на анкерах.

В тоже время широкое внедрение способа крепления армировки анкерами встречает ряд трудностей, особенно при использовании безрасстрельных несущих элементов. Основной проблемой является необходимость компенсации радиального отклонений крепи ствола от проектного положения. Известный способ

компенсирования таких отклонений для балочных расстрелов путем выдвижения концов анкеров в ствол [1], для безрасстрельной армировки не применяется вследствие возможного снижения ее жесткости. Использование составных консолей или специальных кронштейнов приводит к усложнению конструкций. Поэтому для широкого внедрения безрасстрельной армировки в глубоких стволах и обеспечения нормальной работы системы «армирование – крепь ствола» необходимо дальнейшее совершенствование существующих узлов крепления безрасстрельной армировки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. Учеб. для вузов. – М.: Недра, 1994.-382 с.
2. Сыркин П.С., Ягодкин Ф.И., Мартыненко И.А. Технология армирования вертикальных стволов. – М.: Недра, 1996.-202 с.

3. Ягодкин Ф.И., Прокопов А.Ю. Сравнительный анализ жесткостных характеристик и напряженного состояния конструктивных элементов узла крепления расстрела анкерами и бетонированием в лунки.// Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. Науки. – 2003. – Приложение №4.

#### Коротко об авторах

Плешко М.С., Крошнев Д.В. – Шахтинский институт филиал Южно-российского государственного технического университета (ШИ ЮРГТУ), Шахты.

#### ДИССЕРТАЦИИ

##### ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
<b>ЮЖНО-РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ</b>			
БЕЛИКОВА Наталья Валентиновна	Обоснование оптимальных параметров и конструкции искусственных опор для охраны выемочных выработок	25.00.22	к.т.н.

© С.Ю. Семеняк, 2005

С.Ю. Семеняк

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕЛЬПОРА ДЛЯ ВЗРЫВОПОДГОТОВКИ ГОРНОЙ МАССЫ В УСЛОВИЯХ КАРЬЕРОВ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

Семинар № 3

**К** взрывчатым веществам, используемым в горной промышленности, предъявляются следующие требования: безопасность в обращении, достаточная чувствительность, высокая работоспособность. При производстве взрывных работ требуется обеспечить более низкий уровень воздействия сейсмических и ударно-воздушных волн на здания и сооружения.

Стремление изготовить ВВ с параметрами, оптимально удовлетворяющими этим условиям, привели к созданию новых промышленных взрывчатых материалов на основе геляпора ГП-2, разработанного Российским химико-технологическим университетом им. Д.М. Менделеева. Гельпор ГП-2 представляет собой композицию из зерен пироксилинового пороха, гелеобразного раствора окислителей и гранулированной аммиачной селитры. Это гелеобразная эластичная масса с включениями твердых зерен пироксилинового пороха от желтого до черного цвета и белых гранул аммиачной селитры. В качестве гелеобразующей добавки использован полиакриламид.

Компонентный состав геляпора следующий:

Порох пироксилиновый	35±4 / 48±4
Селитра аммиачная	46±4 / 34±4
Натрий азотнокислый	6±0,6 / 5±0,6
Карбамид	3,5±0,4 / 3,2±0,4

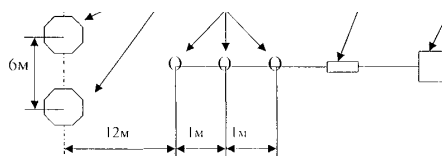
Вода	10±0,2 / 10±0,2
Примечание: В числителе и знаменателе – состав ГП-2У и ГП-2Д соответственно.	

Для оценки эффективности взрывчатых веществ: геляпора ГП-2, граммонита 79/21 и аммонита №6 ЖВ, проводились натурные испытания. В качестве критерия оценки эффективности принимались параметры ударно-воздушной волны (УВВ), образующейся при взрыве одинаковых по массе сосредоточенных зарядов указанных ВВ (рис. 1).

Подрывы сосредоточенных зарядов проводились на поверхности земли (трещиноватый гранитный массив, покрытый слоем щебня толщиной до 20 см) электрическим способом. Иницирование зарядов производилось от шашек-детонаторов ТГФ-850.

По измеренным параметрам проводились расчет и сравнительная оценка тротиловых эквивалентов взрывов зарядов геляпора и граммонита.

Схема постановки опытов:



**Рис. 1.** Схема испытательного поля: 1 – заряд геляпора; 2 – заряд граммонита; 3 – датчики давления ДСЛТ-6; 4 – выносные усилители; 5 – ПЭВМ

Таблица 1  
Результаты измерений параметров ВУВ

Расстояние от центра взрыва а, м	Гельпор			Граммонит				
	Величина избыточного давления во фронте ВУВ $\Delta P_f$ , Па	Время прихода фронта ВУВ в точку измерения $t_{пр}$ , с	Длительность фазы сжатия ВУВ $\tau$ , с	J, кгс/см <sup>2</sup>	Величина избыточного давления во фронте ВУВ $\Delta P_f$ , Па	Время прихода фронта ВУВ в точку измерения $t_{пр}$ , с	Длительность фазы сжатия $\tau$ , с	J, кгс/см <sup>2</sup>
12	$0,7 \cdot 10^4$	$15,1 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$0,78 \cdot 10^{-3}$	$0,55 \cdot 10^4$	$16,7 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$0,75 \cdot 10^{-3}$
13	$0,62 \cdot 10^4$	$17,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$0,68 \cdot 10^{-3}$	$0,68 \cdot 10^4$	$18,7 \cdot 10^{-3}$	-	-
14	$0,51 \cdot 10^4$	$20,15 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$0,28 \cdot 10^{-3}$	$0,52 \cdot 10^4$	$21,7 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$0,57 \cdot 10^{-3}$

Параметры ударных волн пьезоэлектрическим способом измерялись путем аналогового преобразования давления  $P(t)$  в электрический сигнал  $U(t)$ , который регистрировался на персональном компьютере через цифровой регистрирующий комплекс (ЦРК), запускавшийся с помощью проводочного датчика, установленного на детонаторе в заряде ВВ.

Для измерений в испытаниях применялись сульфато-литиевые датчики торцевой конструкции ДСЛТ-20-6. Для всех точек измерений получены полные записи параметров УВВ. Совмещенные эпюры давлений от взрывов зарядов геляпора и граммонита представлены на рис. 2. Результаты измерений представлены в табл. 1.

По результатам измерений проводился расчет избыточного давления от расстояния для заряда тротила массой 40 кг в условиях стандартной атмосферы по формулам Садовского, для идеальной подстилающей поверхности ( $\eta = 1$ ) и для сыпучих грунтов ( $\eta = 0,5$ ).

Необходимо отметить, что характер изменения избыточного давления  $P_f$  с расстоянием при взрыве геляпора, близок к кривой Садовского.

Анализ зависимости избыточного давления от расстояния позволяет выявить две характерные особенности геляпора.

Первой особенностью является то, что время прихода ударной волны от геляпора в точки измерения значительно меньше, чем от граммонита, и это притом, что энергия взрывчатого превращения геляпора на 10-15 % ниже энергии взрывчатого превращения граммонита. Прямолинейная экстраполяция асимптоты геляпора на ординату абсциссы взрыва, отсекает условный начальный радиус примерно на 10 % больший, чем у граммонита, а по объему условной полусферы, характеризующей работоспособность ВВ на начальном этапе, эта разница составит примерно 30 %.

Вторая особенность заключается в более раннем выходе годографа геляпора по сравнению с годографом граммонита на асимптоту звуковой скорости.

Из этих особенностей можно сделать вывод о более высокой, по сравнению с традиционными ВВ, условной работоспособности геляпора в ближней зоне взрыва и более низкой в дальней.

Необходимо отметить, что измеренные значения длительностей фазы сжатия ( $\tau$ ) и для геляпора и для граммонита примерно на порядок меньше расчетных.

Примечательно то, что длительность фазы сжатия при взрыве геляпора с увеличением расстояния уменьшается вопреки классической теории взрыва. Факт уменьшения  $\tau$  с расстоянием подтверждается и акустическими ощущениями участвовавшего в испытаниях персонала, выражающимися в более «мягком» звуковом воздействии.

Выводы:

1. По сравнению с традиционными ВВ условная работоспособность геляпора в ближней зоне взрыва выше, а в дальнейшем ниже.

2. Выход негабарита на взорванный объем горной массы составил с примене-

---

*Рис. 2, а. Эпюры давления при взрыве граммонита и геляпора. 12 м*

*Рис. 2, б. Эпюры давления при взрыве граммонита и геляпора. 13 м*

*Рис. 2, в. Эпюры давления при взрыве граммонита и геляпора. 14 м*

---

нием штатных ВВ и геляпора ГП-2У соответственно 13,6 и 5,7 %, т.е. уменьшился в 2,4 раза. Изменился и сам характер негабарита (из-за повышенной объемной концентрации энергии геляпора), что позволяет эффективнее применять механические средства для вторичного дробления.

3. Существенно уменьшился выход мелких, нетоварных фракций. При высокой объемной концентрации энергии геляпора уменьшился радиус зоны сплошного раздавливания (переизмельчения) и радиус зоны практически сведен к нулю (т.е. бризантность минимальна).

---

### **Коротко об авторах**

Семеняк С.Ю. – Горный факультет.

---