

УДК 622.272

**А.В. Чернышов**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОДНОГО  
МАССИВА НА УЧАСТКАХ СОПРЯЖЕНИЙ  
ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ И ОЧИСТНЫХ ВЫРАБОТОК  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЖЕСТКИХ ОХРАННЫХ  
СООРУЖЕНИЙ**

*Отражены результаты исследований устойчивости породных массивов на участках сопряжений очистных и подготовительных выработок при использовании жёстких охранных сооружений на моделях из оптически активных и эквивалентных материалов.*

*Ключевые слова: трещина, угле вмещающий массив, техногенные воздействия, трещинообразование.*

---

**Н**адёжность поддержания выемочных выработок с целью их повторного использования и управления кровлей в очистных забоях во многом зависят от степени разрушения пород, конфигурации и размеров зон разрушения в окрестностях этих выработок. Разрушенные породы участвуют в формировании нагрузок на крепь последних, оказывая существенное влияние на перераспределение напряжений в массиве горных пород.

Изучение процессов образования и развития трещин в угольном массиве и вмещающих породах, как и самого характера разрушения угля и пород, позволяет прогнозировать наличие зон разрушения и определять формы их и размеры, разработать инженерные методы прогнозирования устойчивости выемочных выработок, выбрать рациональные способы и средства управления горным давлением.

Характер разрушения пород в окрестностях очистных и выемочных выработок в основном определяется

структурными особенностями массива, а также горнотехническими факторами. К первой группе факторов следует отнести слоистость горных пород, их прочностные свойства, наличие различного рода нарушений и др. Ко второй группе — относятся: форма и сечение выработки, схема её расположения в массиве относительно элементов залегания полезного ископаемого, характеристики крепи и способы управления горным давлением при ведении очистных работ.

При исследовании характера деформирования и разрушения угле вмещающих массивов в окрестностях горных выработок особую значимость приобретает вопрос объективной оценки весомости каждого влияющего фактора при одновременном учёте всего комплекса их. В связи со сложностью реальных проявлений геомеханических процессов их исследование в натуральных условиях сопряжено со значительными трудностями. Действенным выходом из этого положения является физическое моделирование устойчивости породных масси-

вов при техногенных воздействиях на них. Данная статья как раз и отражает постановку и результаты исследований устойчивости породных массивов на участках сопряжений очистных и подготовительных выработок при использовании жёстких охранных сооружений на моделях из оптически активных и эквивалентных материалов. Причём задачи этих исследований были разделены на три группы.

Первой группой задач исследований на моделях из оптически активных материалов являлось выявление характера распределения напряжений во вмещающих горных породах вокруг сопряжений очистных и подготовительных выработок при охране последних различными наиболее широко распространёнными типами сооружений и их возможными комбинациями.

Вторая групп задач исследования предусматривала выявление на моделях из эквивалентных материалов качественного характера образования зон разрушения и трещинообразования в горных породах в окрестностях сопряжений лав и подготовительных выработок.

Третья группа задач объединила исследования по установлению механизмов трещинообразования и обрушения пород непосредственной и основной кровель в выработанном пространстве действующей лавы. Моделировался углепородный массив в окрестностях сопряжения лавы и выемочной выработки.

Решение задач второй и третьей групп осуществлялось с использованием плоских моделей из эквивалентных материалов.

Целями исследований с использованием методов эквивалентного моделирования являются:

1. Установление области эффективного применения жёстких охранных

сооружений многоразового использования для охраны выемочных выработок, предназначенных для повторного использования.

2. Выявление возможности применения жёстких сооружений в различных комбинациях с другими типами охранных сооружений, используемых в аналогичных горно-геологических и горнотехнических условиях.

3. Выявление достоинств и недостатков исследуемой технологии охраны в сравнении с традиционно применяемыми технологиями охраны выемочных выработок.

Для оценки напряжённого состояния горного массива автором предложено использовать безразмерный коэффициент концентрации напряжений, представляющий собой отношение напряжений в модели с выработкой к напряжениям в этой же точке модели до проведения этих выработок.

При моделировании методом фотомеханики использовались низкоомодульные оптически активные материалы с заданными модулями упругости и изготавливаемые по известной технологии [3].

Породный массив моделировался тремя слоями оптически активных материалов с разными физико-механическими свойствами, отображающими условия залегания угольного пласта  $\ell_3$  при мощности  $m = 1,0$  м и угле падения  $\alpha = 0^\circ$ , на глубине  $H = 300$  м и прочности вмещающих пород  $G = 68$  МПа в условиях шахты № 81 ПО «Ровенькиантрацит».

Модули упругости пород кровли, почвы и угля в натуре соотносились как 7:5:1. Модель угольного пласта была изготовлена из эпоксиэластика с модулем упругости 0,3 МПа. Модули упругости материала, моделировавшего кровлю и почву пласта, составили 2,1 и 1,5 МПа соответственно.

Для моделирования охранных сооружений использовались сплошные тела с приведённой жёсткостью, а именно:

- обрезные охранные сооружения (А) треугольного поперечного сечения с углами вершин  $45^0$  и  $75^0$  при одинаковой площади основания  $S_{\text{осн}}$  и расстояниях их вершин от бермы и моделируемой выемочной выработки  $a_1 = 1$  м и  $a_2 = 2$  м соответственно;

- тумбы из блоков БЖБТ (В) при расстоянии от бермы и моделируемой выемочной выработки  $b_1 = 0,5$  м и  $b_2 = 1,0$  м соответственно;

- комбинация обрезного охранного сооружения и тумб из блоков БЖБТ (А + В).

Формы моделируемых выемочных выработок были приняты прямоугольная и арочная при нижней, верхней и комбинированной подрывках боковых пород.

Охранные сооружения различных конструкций формируют в кровле и почве зоны высоких концентраций напряжений, но характер их взаимодействия с массивом вмещающих пород неоднозначен.

На сопряжениях лав с выемочными выработками различной формы и видами подрывки боковых пород при применении блоков БЖБТ максимальные касательные напряжения концентрируются в породах кровли непосредственно над углами охранного сооружения (В). Соотношение максимальных касательных напряжений в породах кровли над центром и над углами охранных сооружений из блоков БЖБТ (литых охранных полос) примерно равно 1:2. В этом случае над углами охранных сооружений заданной конфигурации в кровле образуются высокие напряжения  $G \leq 90$  Мпа, превышающие предел прочности пород. Эти напряжения имеют сосредоточенный характер и не рас-

пространяются в глубь породного массива, а разрушение кровельной толщи происходит только у углов охранных сооружений.

Эпюры напряжений в породах кровли и почвы в местах контакта с охранными полосами практически симметричны, то есть, нагрузка, воспринимаемая охранными полосами в местах контактов с породами кровли, полностью передаётся на породы почвы, создавая в них высокие концентрации напряжений, превышающие предел прочности боковых пород. В итоге это весьма неблагоприятно сказывается на эксплуатационном состоянии выемочных выработок.

В породах почвы при применении охранных сооружений (А) располагаются интерференционные полосы низкого порядка, соответствующие напряжениям, не превышающим предел прочности пород на сжатие и на сдвиг.

Кровля в зоне сопряжения выработок находится в сложном напряжённом состоянии. Сдвиг, вероятно, является более важным силовым фактором, чем растяжение, так как обуславливает образование трещин.

Физическая сущность протекающего процесса обрушения, в количественном отношении с позиций метода фотомеханики и в качественном с позиций метода эквивалентного моделирования, интерпретируется следующим образом. Картина изохром в кровле при контакте охранного сооружения обрезного типа позиционируется в направленной заострённой форме, то есть имеет место концентрации интерференционных полос высокого порядка. Значения максимальных касательных напряжений соответствуют порядку интерференционной полосы, и имеют место около вершины охранного со-

оружия. Полосу максимального порядка определить трудно, она идентифицируется с использованием метода экстраполяции.

Изохромы высокого порядка распространяются в глубь кровельной толщи на высоту 4чбм. Действующие напряжения в породах кровли на контакте с охранном сооружением (А) существенно превышают прочностные характеристики пород кровли, что приводит к разрушению последних. По мере увеличения глубины залегания пласта имеет место пропорциональное увеличение значений деформаций и касательных напряжений в вертикальном направлении. Наибольшие значения деформаций имеют место около вершины охранного сооружения (А).

Качественная картина процесса разрушения кровли на моделях из эквивалентных материалов формируется следующим образом: разрушение пород кровли (трещина) начинается над центральной частью охранного сооружения и распространяется вверх в направлении максимальных напряжений сдвига. Разрушение такого типа является результатом действия растягивающих напряжений, возникающих в определённой точке из деформаций сдвига и способствующих появлению достаточно больших значений растягивающих напряжений в точках разрыва.

Методом фотомеханики были исследованы изоклины и траектории главных напряжений в зоне контакта вершины охранного сооружения типа (А) с кровлей. Точка контакта, как показывают трещины изоклины, являются изотропной, и в ней два главных напряжения равны. На поверхности контакта вершины с кровлей возникают большие растягивающие напряжения, что обуславливает образование первоначальной трещины в

точке контакта. Это действие не зависит от величины угла вершины охранного сооружения (А). При увеличении нагрузки на модель над вершиной возникают растягивающие напряжения, которые совместно с осевыми усилиями способствуют образованию больших касательных напряжений. Если нагрузка достаточно велика, то максимальные касательные напряжения превышают предел прочности пород кровли на сдвиг, и основная трещина образуется по направлению оси, а затем появляется трещина, параллельная траекториям касательных напряжений, которая в виде кривых линий поднимается вверх. Линии трещин следуют за опускающимися вниз траекториями напряжений, проходящими через угол вершины охранного сооружения.

Таким образом, можно объективно утверждать, что размер основной трещины и образование трещин скалывания зависят от величины нагрузки, формы охранного сооружения, свойств пород и граничных условий.

Охранное сооружение в виде тумбы (В) препятствует возникновению основной разрушающей трещины. Вследствие меньшего изменения градиента максимального касательного напряжения у поверхности контакта возможно возникает новая сеть мелких трещин одновременно или одна за другой под влиянием максимальных касательных напряжений, то есть имеет место так называемое «раздавливательное действие».

Для определения оптимальных значений угла внедрения охранного сооружения (А) и его месторасположения моделировались охранные сооружения (А) с углами вершин  $45^{\circ}$  и  $75^{\circ}$  при одинаковой площади основания, расположенные на расстоянии 1 и 2 м от берм выемочных выработок арочной и прямоугольной форм. Зна-

чения коэффициентов концентрации напряжений в зоне контакта вершины охранного сооружения с породами кровли уменьшаются почти в 1,5 раза при увеличении угла внедрения от  $45^{\circ}$  до  $75^{\circ}$ . В породах кровли, даже при охранном сооружении с углом вершины  $75^{\circ}$ , в пересчёте на натурные условия сконцентрированы достаточно высокие напряжения, способствующие обрушению консольных частей зависающей кровли. В почке пласта наблюдаются незначительные изменения напряжённого состояния в зависимости от предложенных углов вершины обрезного сооружения.

Коэффициент концентрации напряжений в породах кровли над охранным сооружением (А), расположенным на расстоянии 2 м от бермы выработки (для случая верхней подрывки) в 1,2 раза меньше, чем при расположении на расстоянии 1 м.

Значения контурных напряжений вокруг выработки арочной формы уменьшаются при удалении охранного сооружения на 2 м от выработки. Но в породах кровли (в зоне «козырька») возникают растягивающие напряжения, равные 0,8 МПа, при угле вершины  $45^{\circ}$ . В этом случае, при слабых породах кровли, необходимо принимать дополнительные технологические меры по сохранению этого участка сопряжения.

При комбинированной подрывке выработки арочной формы поперечного сечения в кровле пласта возникают высокие значения сжимающих напряжений. При удалении охранного сооружения на расстояние 2 м от выработки область высоких концентраций напряжений перемещается в глубь массива, что снижает опасность разрушения боковой части бермы. Так как в этом случае выемочная выработка находится в более сложных условиях эксплуатации, то, учитывая

критерии разрушения пород, следует считать, что комбинированная подрывка более целесообразна в твёрдых породах.

Анализ эпюр касательных напряжений в области сопряжения лавы с выемочными выработками прямоугольной формы, пройденными с нижней подрывкой пород, и при расположении охранного сооружения на расстоянии 1 и 2 м от бермы выработки показывает, что характер изменения коэффициента концентрации напряжений не зависит от месторасположения самого охранного сооружения.

В кровле выработки концентрация напряжения минимизируется при удалении охранного сооружения от выработки на 2 м. Напряжения в почве пласта при расположении охранного сооружения на расстоянии 1 м от выработки так велики, что с учётом критериев разрушения и результатов пересчёта на натурные условия, вызывают разрушение бермы выработки. Удаление охранного сооружения на расстояние 2 м от бермы выработки уменьшает почти в 2 раза значения напряжений в породах боковой стороны выработки. С учётом критерия моделирования, (при переходе к натурным условиям), можно сказать, что при крепких породах почвы не происходит разрушение бермы выработки. При слабых породах почвы данный способ охраны неприемлем.

Влияние месторасположения охранного сооружения (А) на распределение напряжений в массиве вокруг выемочной выработки прямоугольной формы поперечного сечения с верхней подрывкой, можно охарактеризовать следующим образом. Концентрация напряжений в почве выработки при удалении охранного сооружения от бермы изменяется незначительно выражено. «Козырёк» кровли пласта

находится в сложном напряжённом состоянии из-за влияния концентраторов-углов выемочной выработки и охранного сооружения.

Удаление охранного сооружения от бермы выработки уменьшает значения коэффициентов концентрации напряжений на контуре выработки. Пересчёт на натурные условия в данном случае показывает наличие максимальных напряжений на контуре выработки при глубине её заложения  $H = 300$  м, поэтому, если прочность пород кровли ниже данной величины, то выработка находится в устойчивом

состоянии. В случае с верхней подрывкой необходимо обращать внимание на крепость пород кровли.

При установке охранного сооружения на расстояниях 1 и 2 м на сопряжении лавы с выемочной выработкой прямоугольной формы поперечного сечения и комбинированной подрывкой боковых пород сохраняются зоны высоких концентраций напряжений в кровле и почве пласта при удалении охранного сооружения на 2 м от бермы выработки. В данном случае следует учитывать прочность пород кровли и пласта.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. – М.: Наука, 1963, — 576 с.

2. Фрохт М. Фотоупругость. – М., Гостехиздат, 1948 – 1950, т.1 – 432 с.; т.2 – 488 с.

3. Исследование массива горных пород методами фотомеханики / А.В. Докукин и др. — М., Наука, 1982, — 272 с. **ГИАБ**

---

#### Коротко об авторе

Чернышов А.В. — докторант каф. ПРПМ, Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru



---

#### РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

**Волошиновский К.И.**, соискатель ученой степени кандидата технических наук, ассистент кафедры АТ, Московский государственный горный университет, e-mail: volkir@mail.ru,

Современные и стандартные датчики перепада давления, применяемые в промышленном учете природного газа-метана (796/03-11 от 13.12.2010) 4 с.

Описаны датчики перепада давления применяемых в коммерческом и техническом учете газа, входящих в государственный реестр средств измерений. Приведены проблемы применения перепадамеров – сокращения количества, повышения метрологического качества, точности проводимых измерений.

Ключевые слова: датчики перепада давления, измерительный участок, конструкция перепадамера.

**Voloshinovskiy K.I.** STATE-OF-THE-ART AND STANDARD SENSORS OF PRESSURE DROP APPLIED IN THE INDUSTRIAL ACCOUNTING OF NATURAL GAS – METHANE.

The sensors of pressure drop applied in the commercial and technical accounting of natural gas itemized in the State Register of Measuring Equipment are described. The issues of the implementation of the pressure drop sensors are discussed: reduction of pressure drop occurrences, improvement of metrological and measuring accuracy.

Pressure drop sensors, measurement area, construction of the pressure drop sensor.