

**В.А. Трофимов, О.Н. Малинникова,
Ю.А. Филиппов**

ОЦЕНКА РАССЛОЕНИЯ ПОРОД КРОВЛИ ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Создана численная модель угольного пласта с вмещающими породами, проведено численное моделирование напряженно-деформированного состояния, выявлены некоторые закономерности расслоения пород кровли при отработке угольного пласта.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, обрушение кровли, численное моделирование, зияющие трещины, граничные условия, угольный пласт, лава.

Подземная добыча полезных ископаемых всегда была одной из наиболее опасных отраслей промышленности во всем мире, причем из причин травматизма (в том числе смертельного) первое место занимают различные обрушения горной массы. В данной статье, рассматривается напряженно-деформированное состояние массива горных пород, предшествующее внезапному обрушению породы кровли угольного пласта. С увеличением глубины горных работ, скорости проходки подготовительных выработок и увеличением нагрузки на лаву, все процессы, связанные с изменением горного давления приобретают более динамичный характер. Возрастает вероятность возникновения и сила газодинамических явлений типа внезапных выбросов угля и газа, горных ударов, обрушений и отжимов с повышенным газовыделением в призабойных зонах угольных пластов. Все более серьезную опасность для шахт начинают представлять ранее малоизвестные, появившиеся в последнее время на шахтах Кузбасса и Воркутского месторождения [1], разломы вмещающих пород с выбросом газа в призабойное пространство лав и штреков, происходящие в результате резких изменений горного давления при быстром подвигании забоя.

Для предупреждения и предотвращения аварийных ситуаций необходимо изучать, процессы, происходящие в породах кровли при перераспределении горного давления, вызванного выемкой полезного ископаемого, и принимать адекватные меры по рациональному управлению горным давлением. Хотя

данному направлению исследований посвящены многочисленные публикации в научных изданиях, оно продолжает оставаться актуальными и в настоящее время.

При очистных работах, участок кровли выработанного пространства остается без опоры, вследствие чего породы кровли будут провисать под собственным весом. Величина провисания пород кровли определяется упругим восстановлением вмещающих пород, в результате действия исходных напряжений в массиве, и расслоением на контактах слоев, формирующих кровлю пласта. Расслоение происходит там, где ослаблена механическая прочность контактов, как на растяжение, так и на сдвиг.

В статье рассмотрено состояние кровли очистной выработки при отработке горизонтальной пластовой залежи без оставления в выработанном пространстве поддерживающих целиков. Задача решалась в рамках линейно-упругой, однородной и изотропной деформационной модели с параметрами: γ – удельный вес, E – модуль упругости и ν – коэффициент Пуассона горных пород.

Рассмотренная модель включала в себя горизонтальную очистную выработку, расположенную на глубине H от дневной поверхности с геометрическими размерами в плане $2L \times 2a$ и высотой h . При этом $2a$ – длина забоя (лавы) $2L$ – глубина продвижения забоя по пласту. Начало прямоугольной декартовой системы координат расположено в центре выработки, ось Ox направлена по ее кровле перпендикулярно забою, ось Oz – вертикально вверх, а ось Oy – параллельно забою (рис. 1).

Кроме того в модель входили вмещающие породы слоистой кровли, показанные на рис. 1: угольный пласт (1), три слоя пород кровли (2, 3, 4) и (5) – массив горных пород, простирающийся до дневной поверхности. Первоначально рассматривался вариант, в котором все слои модели склеены между собой,

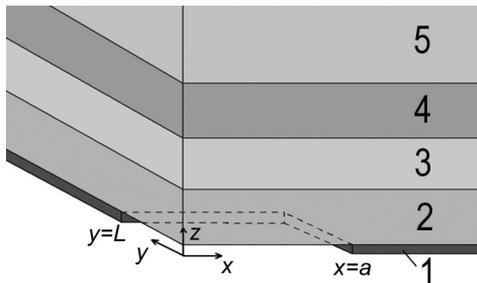


Рис. 1. Геометрия расчетной области

т.е. по ним невозможны взаимные перемещения. Кроме того, породам всех слоев были заданы одинаковые деформационные свойства. Симметрия задачи относительно плоскостей $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$ позволяет ограничиться изображением только восьмой части всего массива, включая выработанное пространство. Для расчета напряженно-деформированного состояния и оценки возможного расслоения пород кровли использовался конечно-элементный программный комплекс ANSYS.

Используемая для расчетов модель разбита на конечные элементы в виде тетраэдров с десятью степенями свободы и возможностью поворота в результате действия внешних и внутренних усилий, определяемых граничными условиями и расчетными значениями [2]. Количество конечных элементов в модели составило 1 309 458 тетраэдров. При расчетах полагалось, что горные породы представляют собой однородный массив, величина модуля Юнга для которого равна $E = 3,5 \cdot 10^3$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, глубина расположения горизонтального пласта $H = 500$ м, а коэффициент бокового распора $k = 1$. При этом, $a = 100$ м и $L = 60$ м.

Далее приведены результаты расчета наиболее важного с точки зрения оценки оседания и обрушения пород кровли параметра – вертикальных смещений вмещающего массива пород, v . Его распределение по всему массиву пород кровли показано на рис. 2 посредством градиентной заливки в соответствии со значениями v (м).

Видно, что весь деформационный процесс локализован над выработанным пространством и в основном ограничивается неким пространственным телом, подобным эллипсоиду, с по-

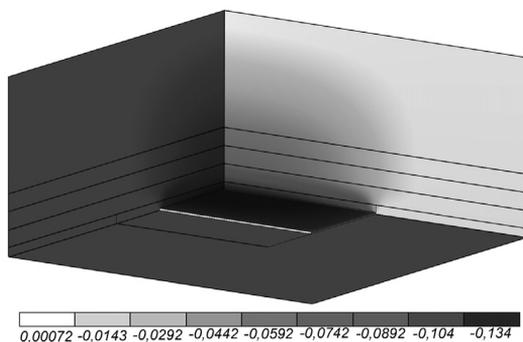


Рис. 2. Распределение вертикальных смещений над выработанным пространством (в м)

луосями a , L в горизонтальном сечении. Размер смещения по вертикальной оси зависит от меньшей из величин a , L и примерно равен ей.

В этой же зоне формируются вертикальные растягивающие напряжения, которые при малой прочности пород на разрыв могут вызвать появление горизонтальных трещин расслоения даже в первоначально ненарушенном массиве.

Помимо геометрических размеров важное влияние на величину оседания имеют деформационные свойства налегающих пород. В соответствии с принятыми значениями параметров максимальное оседание кровли в центре выработанного пространства составило примерно 13,4 см.

Наибольший интерес представляют расчеты для слоистого налегающего массива, когда по контактам слоев возможно расслоение пород, ввиду малой их контактной прочности на разрыв, и появление зияющих трещин. В рамках рассматриваемой численной модели это достигается снятием условия о склеивании слоев, принятом ранее.

Деформационные параметры были приняты одинаковыми для всех слоев и сохранялись прежними. Самая нижняя из показанных на рис. 1 плоскостей контакта между горизонтальными слоями соответствует контакту собственно угольного пласта с налегающими породами и при выемке его на полную мощность становится свободной поверхностью. При расчетах предполагалось, что вынимаемая мощность пласта составляет 2 м.

Три остальных контакта расположены на расстоянии 15 м друг от друга и в той или иной части попадают в зону растяжения, которая была получена при расчетах для сплошного налегающего массива. Естественно предположить, что в этих местах контакт будет подвержен растягивающим напряжениям и при малой контактной прочности на растяжение может разрушиться с образованием зияющей трещины. В тоже время вновь появляющиеся трещины изменяют деформационную картину в кровле, т.е. изменяют размеры зоны растяжения и это в свою очередь приводит к изменению размеров самих образующихся зияющих трещин. Таким образом, для получения реальной картины деформирования необходимо решить геомеханическую задачу для области с неизвестной заранее границей. Однако на этой границе известны граничные условия — отсутствие нормальных и касательных напряжений, а в точках схождения берегов трещины — заданный коэффициент концентрации напряжений. При нулевой прочности на растяжение в этих точ-

ках должна отсутствовать особенность по напряжениям, т.е. реализовываться гладкое смыкание берегов.

Что касается прочностных характеристик на сдвиг по рассматриваемым контактам, то считалось, что на них вне зоны расслоения реализуется полное отсутствие сцепления с возможностью свободного проскальзывания.

Расчеты показывают, что по плоскостям контакта между вторым и третьим и между третьим и четвертым слоями кровли произошло расхождение берегов соответствующих контактов, и образовались зияющие трещины.

Некоторые результаты приведены на рис. 3, 4. На рис. 3 показано распределение расчетных параметров, относящихся ко второму снизу контакту на расстоянии 15 м от отработываемого пласта. На рис. 3, а в плоскости этого контакта отображена конфигурация образовавшейся трещины и величина расхождения ее берегов (в метрах). На рис. 3, б – распределение нормальных напряжений на той же плоскости (в МПа). Сопоставление этих рисунков показывает, что зона, охватываемая зияющей трещиной, значительно меньше размеров выработанного пространства. Она никогда не может выйти за его пределы, поскольку барьером для ее распространения является зона повышенных нормальных напряжений, локализованная по границам этого пространства и показанная на рис. 3, б светлой заливкой.

Аналогичные распределения тех же параметров получены и на следующем от кровли пласта контакте. Однако размеры зия-

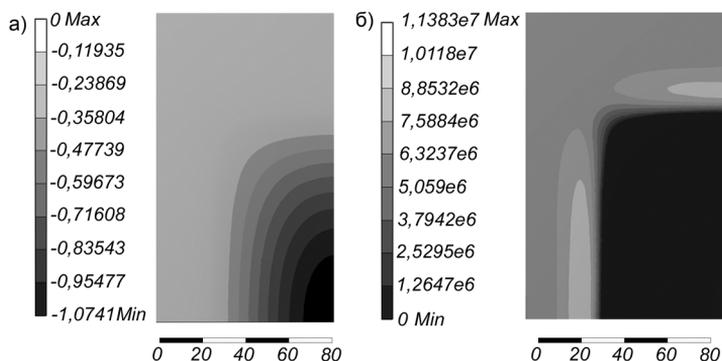


Рис. 3. Расхождение берегов (а) в метрах и нормальные напряжения (б) в МПа на первом от кровли пласта контакте, расположенном в 15 м от пласта

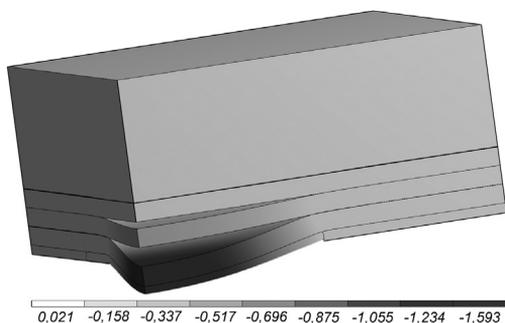


Рис. 4. Вертикальные смещения при формировании зияющих трещин расслоения (в м)

ющей трещины и расхождение берегов значительно меньше, чем для контакта, расположенного в 15 м от пласта.

Раскрытие трещин по третьему контакту от пласта выявить не удалось, хотя он так же, как и оба предыдущих, попадает в зону растяжения, полученную ранее, для однородного налегающего массива.

На рис. 4 показан общий характер расслоения пород кровли в рассматриваемом случае. При этом вертикальный масштаб для наглядности увеличен.

Рассмотренные особенности напряженно-деформированного состояния определяют состояние и поведение кровли, а также места ее возможного разрушения. В отслоившейся части кровли по контуру выработанного пространства могут возникать зоны горизонтальных растягивающих напряжений, способствующие появлению вертикальных, секущих слоев трещин растяжений. По мере развития выработанного пространства, т.е. увеличения L , размер этих зон в показанной плоскости постепенно увеличивается, кроме того они растут и в вертикальных сечениях слоев. При достижении критических размеров происходит потеря устойчивости слоя, и он обрушается по границам выработанного пространства [3].

Однако, при любой деформационной модели налегающего массива наиболее трудный вопрос связан с критерием разрушения, который бы позволил оценить предельное значение L , при котором происходит полное разрушение того или иного породного слоя в налегающем массиве. В конечном счете, это определяет шаги первичной и последующих посадок кровли. Его решение в значительной степени зависит от схемы возможного разрушения слоев. Следует учитывать характер взаимодействия

непосредственной и основной кровли, наличие в них секущих трещин, их деформируемость и др. Подобные схемы достаточно подробно рассмотрены в [4].

Выводы

В статье рассмотрено напряженно-деформированное состояние пород кровли с учетом возможного ее расслоения и формирования зон горизонтальных растягивающих напряжений, размеры которых постепенно увеличивались при развитии выработанного пространства. При этом возрастают напряжения в кровле, что в итоге приводит к появлению вертикальных трещин по контуру выработанного пространства с последующим обрушением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Захаров В.Н.* Влияние техногенных геодинамических процессов на устойчивость приконтурного массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – Т. 1. – № 12. – С. 159–168.
2. *Крауч С., Старфилд А.* Методы граничных элементов в механике твердого тела. – М.: Мир, 1983.
3. *Кузнецов С.В., Трофимов В.А.* Формирование зон растяжения и расслоения в кровле протяженной очистной выработки // ФТПРПИ. – 2012. – № 5. – С. 1–11.
4. *Борисов А.А.* Механика горных пород и массивов. – М.: Недра, 1980. – 360 с. **ИТАЭ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Трофимов В.А. – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: asas_2001@mail.ru,
Малинникова О.Н. – доктор технических наук, зав. лабораторией, e-mail: malinnikova@mail.ru,
Филиппов Ю.А. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: filippov.yury@gmail.com, ИПКОН РАН.

UDC 622.83

V.A. Trofimov, O.N. Malinnikova, Yu.A. Filippov
STRATIFICATION ASSESSMENT OF ROOF ROCKS
AT COAL SEAM MINING

A numerical model of a coal seam with enclosing rocks was created. Numerical modeling of the stress-strain state was carried out and revealed some regularities of roof rock stratification during the mining of a coal seam.

Key words: stress-strain state, roof collapse, numerical modeling, gaping cracks, boundary conditions, the coal seam, longwall.

AUTHORS

*Trofimov V.A.*¹, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher,
e-mail: asas2001@mail.ru,

*Malinnikova O.N.*¹, Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory,
e-mail: malinnikova@mail.ru,

*Filippov U.A.*¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
e-mail: filippov.yury@gmail.com,

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Zakharov V.N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2011, vol. 1, no 12, pp. 159–168.

2. Krauch S., Starfield A. *Metody granichnykh elementov v mekhanike tverdogo tela* (Boundary element methods in solid mechanics), Moscow, Mir, 1983.

3. Kuznetsov S.V., Trofimov V.A. *Fiziko-tekhicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2012, no 5, pp. 1–11.

4. Borisov A.A. *Mekhanika gornykh porod i massivov* (Mechanics of rocks and rock masses), Moscow, Nedra, 1980, 360 p.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

КОМБИНИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

*Брыляков Ю.Е., Кострова М.А., Zubov B.П., Васильев В.Е., Савченко В.В.,
Согрин Б.Б., Курков А.В., Броницкая Е.С., Рогожин А.А.*

Опубликованы избранные доклады участников Международной научно-технической конференции «Комбинированные процессы переработки минерального сырья: теория и практика» 19–20 мая 2015 г., посвященной 95-летию создания кафедры обогащения полезных ископаемых, представленные в секциях «Управление качеством горной массы при добыче полезных ископаемых», «Процессы рудоподготовки и комплексной переработки минерального сырья».

THE COMBINED PROCESSES OF PROCESSING OF MINERAL RAW MATERIALS: THEORY AND PRACTICE

*Brylyakov, E. Yu., Kostrov, M. A., Zubov V.P., VasIIIev E.V., Savchenko V.V.,
SogIn B.B., A. V. Kurkov, E. BronItskaya S., RogozhIn A.A.*

Published selected papers of participants of International scientific-technical conference «Combined processes of processing of mineral raw materials: theory and practice» on 19-20 may 2015, dedicated to the 95th anniversary of the creation of the Department of mineral processing, presented in the sections «Management of quality of rock mass in mining, ore preparation and complex processing of mineral raw materials».