

УДК 622:550.34.01

*А.А. ЧЕРЕПОВ**, *В.А. ПИЧУГИН**, *П.В. МАКАРОВ**,***, *Е.П. ЕВТУШЕНКО***

АНАЛИЗ РАЗРАБОТКИ УДАРООПАСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НА ПРИМЕРЕ ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА ЛАВЫ 3–32 ФИЛИАЛА «ШАХТА «АЛАРДИНСКАЯ» ОАО «ОУК «ЮЖКУЗБАССУГОЛЬ». ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПАСНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ГОРНОМ МАССИВЕ С ВЫРАБОТКАМИ

Представлены данные по изучению причин различных разрушений целиков, почвы, элементов горного массива в пределах зоны влияния опорного давления и перечень принятых мер после происшествия при разработке удароопасных угольных пластов на примере выемочного участка лавы 3–32 филиала «Шахта «Алардинская» ОАО «ОУК «Южкузбассуголь». Приведены примеры тестовых расчётов обрушений кровли для различных скоростей накопления повреждений в горном массиве с выработками.

Ключевые слова: горный массив, ударная опасность, численное моделирование.

Введение

Современные технологии разработки удароопасных угольных пластов требуют от научного и инженерного персонала не только проведения непрерывного мониторинга текущего состояния горного массива с выработками и принятия комплексных технических решений, снижающих возможность возникновения горных ударов и выбросов, но и совершенствования методики прогноза этих опасных динамических явлений, в том числе на основе современных методов анализа НДС горного массива с выработками, выполненного методами геомеханического моделирования.

В настоящей работе представлен анализ ряда динамических событий, произошедших при разработке удароопасного угольного пласта 3-3а шахты «Алардинская», обсуждены технологические мероприятия, направленные на снижение опасных динамических явлений, и приведены результаты тестовых расчётов обрушений кровли, выполненных с целью разработки прогностической модели опасных динамических явлений в горных массивах с выработками.

Примеры негативных динамических явлений при обработке удароопасных угольных пластов

Поле филиала «Шахта «Алардинская» расположено в Кондомском геолого-экономическом районе Кузбасса. Тектоническое строение Кондомского района определено его географическим положением. Район приурочен к стыку двух горных систем – Салаирского кряжа и Кузнецкого Алатау. В результате тектонических подвижек палеозойские отложения района собраны в крупные синклиналильные складки, залегание которых осложнено более мелкой складчатостью и дизъюнктивными нарушениями.

Филиал «Шахта «Алардинская» ведёт разработку двукрылой панели в центральном блоке пласта 3-3а. С глубины 300 м пласт 3-3а отнесён к опасным по горным ударам и угрожаемым по внезапным выбросам. Пласт 3-3а сложного строения, уголь крепкий, крепость $f = 1,5$, вязкий. Сопротивление угля резанию 150–160 кгс/см².

Ложная кровля пласта – углистый алевролит, черный, хрупкий, крепостью $f = 2–3$, мощностью 0,1–0,3 м, неустойчивый. Непосредственная кровля – алевролит темно-серый крупнозернистый, слоистый за счет переслаивания с прослойками песчаника, крепостью $f = 5–7$, мощностью 3,3–20,9 м. Средней устойчивости. Основная кровля – песчаник серый мелкозернистый, крупнослоистый, крепостью $f = 7–8$, мощностью 1,0–13,5 м. Почва пласта: непосредственная – алевролит темно-серый среднезернистый, слоистый, крепостью $f = 5$.

По результатам проведенных геофизических исследований, анализа данных геологоразведочных и эксплуатационных работ было определено, что в контуре столба № 3-32 породы кровли обладают одинаковыми свойствами по устойчивости, обрушению и нагрузочным свойствам и управ-

лению при ведении очистных работ. Аномальных зон выявлено не было. Предупреждение горных ударов обеспечивалось следующими мерами:

- текущий прогноз удароопасности в лаве и прилегающих подготовительных выработках;
- бурение разгрузочных скважин в случае определения категории «опасно»;
- предварительная разгрузка пласта бурением разгрузочных скважин в передовой выработке (вентиляционном ходке) до подхода лавы.

18.04.2011 произошло разрушение почвы и обрушение угля с боков вентиляционного штрека 3-32, сопровождавшееся повышенным метановыделением. Со стороны межлавного целика бок обрушился на протяжении 89 м, со стороны выемочного столба – на протяжении 29 м. Вентиляционный штрек 3-32 был заполнен обрушенным и выдавленным из почвы углём на 80 % сечения. Объём разрушенной массы угля составил 400 м³.

В результате изучения материалов, наблюдений и исследований комиссией установлена основная причина – зависание консоли основной кровли в выработанном пространстве лавы 3-32.

Проектно-эксплуатационная документация полностью пересмотрена. Разработаны и согласованы с профильными институтами дополнительные меры, усиленный контроль за напряжённо-деформированным состоянием, обеспечивающие разупрочнение краевой части межлавного целика и массива в пределах зоны влияния опорного давления, в том числе:

- бурение разгрузочных скважин с увеличенным до 130 мм диаметром в межлавный целик, из груди забоя лавы 3-32 и в обе стороны вентиляционного ходка № 3 до возобновления работы лавы;
- разгрузка межлавного целика бурением скважин диаметром 130 мм через 1,2 м;
- учащение инструментального прогноза удароопасности межлавного целика до 10 м подвигания лавы и прогноза в лаве до 20 м её подвигания.

19.05.2011 эксплуатация лавы была возобновлена с выполнением вышеприведённых дополнительных мероприятий. За 31 сут работы подвигание лавы после приостановки составило 113 м. Средняя скорость подвигания 3,6 м/сут.

С опережением лавы на 250 м произведена разгрузка межлавного целика скважинами Ø 130 мм. Пробурено более 370 разгрузочных скважин общей протяжённостью более 11 км. Пробурено около 200 прогнозных шпуров. Инструментальный прогноз удароопасности показывал отсутствие опасных участков. Выход буровой мелочи был меньше критического значения в среднем в 2 раза, максимальные значения лежали в диапазоне 0,7–0,9 от критических.

19.06.2011 произошло разрушение краевой части межлавного целика и вывал угля в рабочее пространство вентиляционного штрека 3-32. Протяжённость нарушенного участка составила 112 м. Объём разрушенной массы угля 1200 м³.

В результате расследования комиссией определены следующие причины происшествия:

- увеличение мощности песчаников в основной кровле пласта и, как и в первом случае, их зависание;
- влияние зоны стационарного опорного давления ранее отработанной лавы 3-30;
- наличие отжимов угля в бортах выработки вследствие недостаточности методов прогноза горных ударов.

Проанализированы также и другие разрушения в кровле, почве и целиках. Накоплена также достаточная для первичного анализа и выводов база данных сейсмического контроля.

Математическая постановка задачи. Модель квазихрупкой среды.

Расчёт зависаний и обрушений кровли

Как видно из приведённых примеров, одной из главных причин обрушений является зависание кровли над выработанным пространством. В работах [1, 2] предложена новая методика расчёта эволюции горного массива с выработками, позволяющая оценивать особенности накопления повреждений в кровле над выработанным пространством, характерные длины зависающей консоли, включая пространственно-временные параметры её катастрофических обрушений [1, 2]. Показано, что при малых скоростях подвигания забоя опасных зависаний и обрушений кровли не происходит. В условиях такого квазистационарного режима обрушение кровли происходит по мере продвижения груди забоя. При высоких скоростях подвигания забоя (например, более 4 м/сут, в зависимости от физико-механических свойств горного массива) наблюдается нестационарный режим. В этом случае системы магистральных трещин, приводящие к посадкам кровли, не успевают

образоваться непосредственно за движущимся забоем, грудь забоя уходит достаточно далеко вперёд, оставляя за собой протяжённые участки зависшей кровли. Обрушение таких протяжённых участков кровли приводит к серьёзным негативным последствиям. Остановка работ в шахте на длительный период, как было обсуждено выше, также при возобновлении работ может привести к опасным обрушениям. За время остановки работ в кровле копятся повреждения, образуются магистральные трещины. Возобновление работ увеличивает длину зависшей консоли и дополнительные напряжения могут привести к обрушениям, о чём и говорилось ранее.

Решение задачи об эволюции НДС горного массива в поле сил тяжести выполнено на основе математической теории эволюции нагружаемых твёрдых тел и сред [3].

В 2D- и 3D-постановках численно решалась полная система уравнений механики деформируемого твёрдого тела, включающая законы сохранения массы, импульса и энергии:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \bar{v} = 0, \quad \rho \frac{dv_i}{dt} = \rho F_i + \nabla \sigma_{ik}, \quad \rho \dot{E} = \sigma_{ik} \dot{\varepsilon}_{ik}, \quad \rho \frac{dE}{dt} = \sigma_{ik} \frac{d\dot{\varepsilon}_{ik}}{dt}, \quad (1)$$

эволюционные определяющие уравнения первой группы [3]:

$$\dot{\sigma}_{ik} = \lambda(\dot{\theta}^T - \dot{\theta}^P) \delta_{ik} + 2\mu(\dot{\varepsilon}_{ik}^T - \dot{\varepsilon}_{ik}^P). \quad (2)$$

Здесь $\dot{\varepsilon}_{ik}^T = \frac{1}{2} \left(\frac{dv_i}{dx^k} + \frac{dv_k}{dx^i} \right)$ – компоненты тензора скорости деформации; $\dot{\theta}^T = \dot{\varepsilon}_{ii}^T$ – полная скорость объёмной деформации; $\dot{\theta}^P = \dot{\varepsilon}_{ii}^P$ – неупругая составляющая скорости объёмной деформации; E – внутренняя энергия единицы начального объёма; δ_{ik} – символ Кронекера; λ и μ – коэффициенты Ламе; точка над символом означает материальную производную по времени. Полная скорость деформаций есть сумма упругой и неупругой составляющих: $\dot{\varepsilon}_{ij}^T = \dot{\varepsilon}_{ij}^E + \dot{\varepsilon}_{ij}^P$.

В данных расчётах среда считается баротропной, а релаксация – мгновенной. Кроме того, модель квазихрупкой среды учитывает её чувствительность к давлению – предельная поверхность в пространстве напряжений включает первый инвариант напряжений:

$$f(\sigma) = \frac{\alpha}{3} I_1 + I_2^{1/2} - Y. \quad (3)$$

Здесь I_1 и I_2 – первый и второй инварианты тензора напряжений; α имеет смысл коэффициента внутреннего трения; Y – предел прочности. В отличие от классической модели Друккера – Прагера, в настоящей работе используется модель Николаевского с неассоциированным законом течения [4]:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^P = \lambda \frac{\partial g(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}}; \quad g(\sigma_{ij}) = I_2 + \frac{\Lambda}{3} I_1 \left(2Y - \frac{\alpha}{3} I_1 \right) + \text{const}; \quad \dot{\varepsilon}_{ij}^P = \left(s_{ij} + \frac{2}{3} \Lambda \left(Y - \frac{\alpha}{3} I_1 \right) \delta_{ij} \right) \dot{\lambda}, \quad (4)$$

где λ – пластический множитель, определяемый из условия удовлетворения напряжённого состояния функции текучести (3), а пластический потенциал $g(\sigma_{ij})$ имеет вид (4), где Λ – коэффициент (функция) дилатансии; s_{ij} – компоненты девиатора напряжений.

Полагаем, что макроскопическая прочность нагружаемой среды деградирует со временем за счёт накопления средой микро и мезоповреждений различных масштабов [5, 6]. Этот процесс описан интегрально заданием функции деградации D . В неповреждённой среде $D = 0$, в полностью разрушенной среде $D = 1$. Более подробно модель деградирующей среды описана в [6]. Функцию деградации прочности D (накопления повреждений во времени t) в нагружаемой среде предлагается взять в зависимости от накопленной средой неупругой деформации $\varepsilon_p = \varepsilon_{\text{тек}} - \varepsilon_0$ с учётом вида напряжённого состояния в следующей форме:

$$Y = Y_0(1 - D), \quad 0 \leq D \leq 1; \quad (5)$$

$$D = \int_{t_0}^t \frac{\left[(\varepsilon_{\text{тек}} - \varepsilon_0)^2 + K(\varepsilon_{\text{тек}} - \varepsilon_0')^2 \right] dt}{\varepsilon_*^2 t_*}, \quad \varepsilon_* = \varepsilon_{0*} (1 + \gamma)^n. \quad (6)$$

Здесь t_* – некоторое характерное значение времени, определяющее скорость накопления средой повреждений; ε_* – функция напряжённого состояния, определяемого параметром Лоде – Надаи γ ;

ε_{0*} – параметр модели; $K = 0$ при $\gamma \geq 0$ и $K = 1$ при $\gamma < 0$, $\gamma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1$ – коэффициент Лоде –

Надаи; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; ε_0 – малое значение деформации, соответствующее упругому отклику среды (составляет 0,2–0,5 от предела упругости в зависимости от решаемой задачи), что позволяет накапливаться повреждениям за счёт работы мезоконцентраторов напряжений различной физической природы уже на «упругой» стадии нагружения; $\varepsilon'_0 \ll \varepsilon_0$ и позволяет среде более интенсивно накапливать повреждения в области растягивающих напряжений, что и приводит к существенно более низкой её прочности при растяжении, чем при сжатии. Функция ε_* зависит от вида напряжённого состояния и резко падает в области растягивающих напряжений при $\gamma < 0$, что также обеспечивает интенсивное накопление средой повреждений в области растяжений-сдвигов.

Принципиальным отличием такой модели от традиционных подходов предельного проектирования является то, что прочность среды формируется в ходе нагружения в соответствии со сложившимся НДС, то есть начальная (теоретическая) прочность деградирует по мере накопления средой неупругих деформаций и повреждений. Это фактически означает, что разрушение происходит в локальных областях среды, накопившей существенные повреждения, в которой физико-механические свойства деградировали в ходе нагружения практически до нуля. Такие области локализованных повреждений на заключительных этапах деградации среды эволюционируют в макротрещины.

Тестовые расчёты обрушений кровли, максимально приближенные по параметрам среды к реальной ситуации, проанализированной выше, выполнены по представленной модели для двух режимов: квазистационарного (рис. 1) и неравновесного (рис. 2), приведшего к зависанию протяжённых участков кровли. В случае квазистационарного режима протяжённых участков зависающей кровли не наблюдается, обрушения происходят периодически, шаг обрушения мал. На рис. 1 чёрным цветом показаны магистральные трещины в непосредственной и основной кровле и выработанное пространство. Почва и разрушение в почве также рассчитывались, но на рис. 1 не приведены. Мощность угольного пласта 3 м, мощность непосредственной кровли H 8 м.

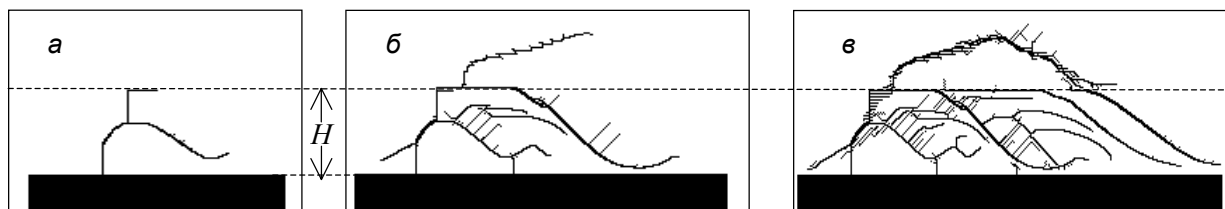


Рис. 1. Расчёт обрушения кровли (показаны магистральные трещины) для трёх последовательных времён подвигания забоя для случая квазистационарного режима

В случае нестационарного режима обрушений кровли расчёты показывают, что длина зависающей консоли тем больше, чем выше скорость подвигания забоя. На рис. 2 показаны первые и последующие посадки кровли, оттенками серого показана степень повреждённости среды для трёх разных скоростей подвигания забоя 2, 4 и 8 м/сут, чёрным – пласт невыработанного угля. На рис. 2 для этих же скоростей показаны рассчитанные длины последующих посадок кровли. Скорость накопления повреждений в этом случае приблизительно в 2 раза ниже, чем для случая, представленного на рис. 1. Поэтому для сравнительно медленных скоростей подвигания забоя наблюдаются протяжённые участки зависающей кровли. Все представленные расчёты показывают правильное качество и согласуются с реальным процессом обрушений кровли.

Основным варьируемым параметром является скорость накопления нагружаемой геосредой повреждений. Эта скорость зависит от многих факторов: физико-механических характеристик среды, глубины залегания (т.е. величины нагрузки), вида напряжённого состояния, влажности и т.д.

В силу сказанного этот параметр является феноменологическим и может быть подобран для определённых конкретных условий на основе наблюдений и численного эксперимента, что и ставит одно из направлений дальнейшей работы.

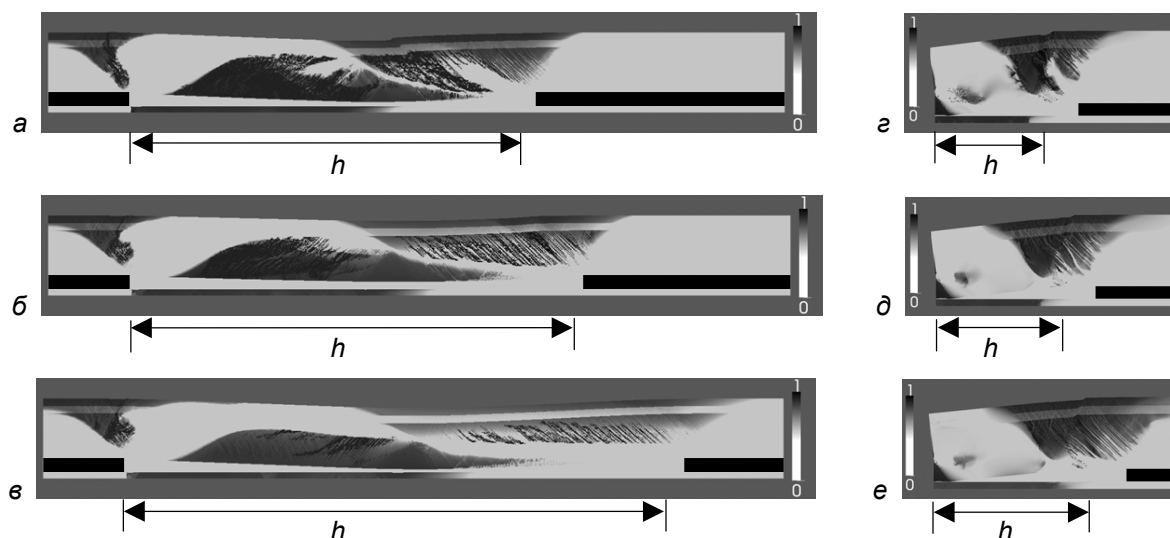


Рис. 2. Расчёт первых (*a*, *б*, *в*) и вторичных (*з*, *д*, *е*) посадок кровли для различных скоростей подвигания забоя: *a*, *з* – 2 м/сут; *б*, *д* – 4 м/сут; *в*, *е* – 8 м/сут. Соответствующие величины *h* первичных посадок кровли равны: 50 м (*a*), 60 м (*б*), 75 м (*в*), для вторичных посадок *h* = 11 м (*з*), 13 м (*д*) и 19 м (*е*)

Представленная модель протестирована также на описании разрушения хрупких образцов, в частности бетонов [6]. Эти расчёты продемонстрировали все характерные особенности квазихрупкого разрушения, включая сверхбыструю катастрофическую стадию. В настоящих расчётах заключительная стадия разрушения (собственно обрушение кровли) также развивается в сверхбыстром режиме как катастрофа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Евтушенко Е.П. и др. // Физич. мезомех. – 2008. – Т. 11. – № 1. – С. 44–50.
2. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Евтушенко Е.П. и др. // Физич. мезомех. – 2009. – Т. 12. – № 1. – С. 75–82.
3. Макаров П.В. // Физич. мезомех. – 2008. – Т. 11. – № 3. – С. 19–35.
4. Гарагаш И.А., Николаевский В.Н. // Успехи механики. – 1989. – Т. 12. – № 1. – С. 131–183.
5. Макаров П.В. // Физич. мезомех. – 2010. – Т. 13. – № 5. – С. 97–112.
6. Евтушенко Е.П., Еремин М.О., Костандов Ю.А. и др. // Физич. мезомех. – 2012. – Т. 15. – № 3 – С. 35–44.

*ОАО «ОУК «Южкузбассуголь», г. Новокузнецк, Россия

**Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

***Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: pvm@ispms.tsc.ru

Поступила в редакцию 10.07.12.

Черепов Андрей Александрович, аспирант каф. теории прочности и проектирования;

Пичугин Владимир Александрович, аспирант каф. математической физики;

Макаров Павел Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, профессор каф. теории прочности и проектирования;

Евтушенко Евгений Павлович, программист.