

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВЫРАБОТОК

3. Барановский, канд. техн. наук (Силезский технический университет, РП)

Розглянуто можливості руйнування масиву поблизу гірничих виробок під дією динамічного навантаження з урахуванням його наслідків. Розроблено конструктивно-технологічні заходи, що забезпечують безаварійне функціонування виробок.

Интенсивное развитие горнодобывающей промышленности еще в 70-х годах прошлого столетия поставило новые задачи перед базовыми теоретическими науками для комплексного усовершенствования горного производства. Механика горных пород в новых условиях становится важнейшей частью горной науки, объединяющей большое число дисциплин для решения важных вопросов добычи полезных ископаемых на больших глубинах. При переходе на большие глубины резко ухудшаются условия эксплуатации месторождений, в основном за счет увеличения горного давления и динамических форм его проявления в виде сотрясений (горных ударов).

Характерной особенностью разработки на больших глубинах является соизмеримость возникающих в конструкциях напряжений и предела прочности разрабатываемых пластов. Поэтому качественные оценки устойчивости конструктивных элементов систем разработки и их подчиненность общим вопросам организации технологических схем добычи угля, как это принято на небольших глубинах, уступают место строгому количественному анализу поля напряжений в зоне очистных работ на всех этапах выемки. Возникает необходимость поиска направленных методов воздействия на это поле с целью локализации или снятия опасных напряжений в тех конструкциях, без которых невозможно осуществить выемку полезного ископаемого. В условиях больших глубин необходим поиск методов активного воздействия на напряженное состояние зоны очистных работ как за счет геометрии и пространственного расположения конструктивных элементов систем разработки, так и путем изменения их свойств, при которых обеспечивается поглощение части энергии упругого сжатия в виде работы деформирования горных конструкций.

Анализ опыта разработки угольных месторождений, а также выполненные исследования позволяют выделить основные факторы, влияющие на характер напряженного состояния зоны разработки угольных пластов. К ним в первую очередь относятся:

величина и характер исходного поля напряжений, зависящего как от глубины разработки, так и интенсивности развития тектонических процессов в данном регионе;

физико-механические свойства угля и вмещающих пород, характер их

поведения под нагрузкой, степень нарушенности массивов;

последовательность и порядок выемки запасов в пределах шахтного поля; конструкция и класс систем разработки, применяемые на данном месторождении и предопределяющие принятый способ управления горным давлением;

динамические формы проявления горного давления, связанные с горными ударами и сейсмическими проявлениями при различных условиях накопления и реализации энергии упругого сжатия.

Отметим, что многие аспекты устойчивости горных выработок для статических нагрузок достаточно полно освещены. В частности, некоторые важные вопросы для польской горнодобывающей промышленности исследованы в работах [1, 4, 5]. Несмотря на приведенные достаточно фундаментальные исследования по устойчивости горных выработок в статической постановке, многие аспекты этого вопроса нуждаются в доработке.

Совершенно иная картина наблюдается в исследовании действия динамических нагрузок на горизонтальные горные выработки, изучению которой посвящены лишь отдельные публикации. Так, в монографии [1] с помощью инженерных методов проведена оценка влияния горных ударов на горизонтальные горные выработки, расположенные в слоистых массивах.

Дальнейшее развитие угольной промышленности Польши требует поддержания в надлежащем порядке на протяжении всего периода эксплуатации сети подземных горных выработок, без которых невозможна устойчивая добыча угля. Эта задача значительно усложняется при увеличении глубины залегания разрабатываемых пластов из-за сложных горно-геологических условий слоистых массивов горных пород, в которых толщина угольных пластов достигает 30 м. При выемке больших масс угля возникают благоприятные условия для переупаковки слоев, что может сопровождаться горными ударами. К побочным явлениям могут привести также сейсмические воздействия на углесодержащие массивы, вызванные тектоническими или взрывными процессами. Поэтому на современном этапе развития угольной промышленности Польши со всей очевидностью и остротой стала проблема учета динамических факторов при проектировании эксплуатации для дальнейшего поддержания в безопасном состоянии горных выработок различного профиля.

Динамический метод исследования является более общим по сравнению со статическим, хотя и более сложным. Он применим к динамическим и статическим задачам.

Для изучения динамических явлений около горных выработок можно использовать постановки и математический аппарат лучевой теории, с помощью которой исследуется взаимодействие ударных волн с горными выработками и включениями различных очертаний [2–4]. Алгоритмичность разработанных методов позволяет с помощью вычислительной техники быстро оценить устойчивость горной выработки и прогнозировать ее динамическое поведение.

При компьютерном моделировании устойчивости массивов горных пород в окрестности шахтных выработок под действием ударных волн сейсмических и взрывных воздействий с учетом наличия предварительных напряжений горного давления необходимо решать две задачи механики горных пород. Первая заключается в построении полей напряжений и деформаций, возникающих под действием сил гравитации во всей области поперечного сечения анализируемой выработки. Задача статики решается с помощью метода конечных элементов по специально разработанной программе. Она реализуется решением системы линейных алгебраических уравнений $[K] \{u\} = \{f\}$ для конечноэлементной модели. Здесь $[K]$ – матрица жесткости упругой среды, автоматически генерируемая программным комплексом на основе исходных данных о геометрии горной выработки, физических свойствах породы и массовых силах $\{f\}$ (силах тяжести). По найденному значению вектора $\{u\}$ подсчитываются компоненты тензора статических напряжений σ^c породы. После этого осуществляется переход к постановке и решению задачи о взаимодействии ударной волны с граничной поверхностью выработки. На этом этапе лучевыми методами в теории сейсмологии строятся эволюционирующие фронты ударных волн и подсчитываются значения ударных импульсов на их поверхностях. Поверхность фронта волны определяется равенством [4] $\tau(x_1, x_2, x_3) - t = 0$, в котором функция τ удовлетворяет известному в лучевом методе уравнению

$$V^2 \sum_{k=1}^3 \left(\frac{\partial \tau}{\partial x_k} \right)^2 = 1,$$

где t – время, x_1, x_2, x_3 – декартовы координаты, V – скорость распространения упругой волны в данной среде.

При взаимодействии фронта ударной волны с поверхностью выработки происходит формирование отраженных продольной и поперечной волн, приводящих к существенной перестройке полей напряжений и деформаций. Расчет этих напряжений осуществляется с помощью специально разработанных программ.

На основе решений указанных выше задач подсчитываются суммарные компоненты тензора напряжений в наиболее напряженных зонах в окрестности поверхности выработки и определяются критические состояния породы. Они подсчитываются по критерию динамической устойчивости породы, в соответствии с которым критическое состояние наступает, когда суммарное статическое (σ^c) и динамическое (σ^d) напряжение достигает предельного значения Мизеса $[\sigma]$:

$$\sigma_{\text{Мизеса}} = (\sigma^c + \sigma^d)_{\text{Мизеса}} = [\sigma] = 8 \text{ МПа};$$

$$|\sigma| = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \left[(\sigma_1^c + \sigma_1^d) - (\sigma_2^c + \sigma_2^d) \right]^2 + \left[(\sigma_2^c + \sigma_2^d) - (\sigma_3^c + \sigma_3^d) \right]^2 + \left[(\sigma_3^c + \sigma_3^d) - (\sigma_1^c + \sigma_1^d) \right]^2 \right\}},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения в породе.

В соответствии с этой методикой были определены статические и динамические напряженные состояния горных пород в окрестности горных выработок прямоугольного поперечного сечения на глубине 600 м в угольном пласте 510 шахты Suha Gora. Прямоугольное сечение выработки было выбрано в связи с тем, что это наиболее сложное сечение для расчетов. Рассмотрен случай свободной поверхности горной выработки. Расчеты показывают, что в полях статических напряжений Мизеса, созданных действием сил тяжести пород, наибольшие значения этих напряжений для неподкрепленной поверхности выработки достигают 48 МПа, для подкрепленной выработки – в два раза меньше, а подкрепляющие элементы работают в упругой стадии. На рис. 1 показаны фронты ударных волн, формируемые при действии падающей ударной волны напряжением $\sigma_{\text{иниц}} = 5$ МПа на свободную поверхность выработки прямоугольного профиля (рис. 1, а). Рис. 1, б иллюстрирует характер распределения динамических напряжений σ^d на фронтах отраженных продольной (σ_p) и поперечной (τ_s) волн в узловых точках поверхности фронтов, расположенных на контуре сечения горной выработки.

При выбранных параметрах, определяющих статическое и динамическое состояние горной породы в окрестности выработки прямоугольной формы, дополнительные динамические напряжения σ^d достигают 11% от σ^c и должны быть обязательно учтены при теоретическом моделировании напряженного состояния и устойчивости горной породы.

Наступление критического состояния пород в окрестности угла горной выработки при нормальном падении плоской ударной волны на прямоугольную часть выработки показано на рис. 2. По оси абсцисс отложены номера точек верхней части контура начиная с вершины, на оси ординат отложены напряжения Мизеса. Статическая кривая Мизеса характеризует напряжения Мизеса, вызванные действием только сил тяжести. Динамическая кривая Мизеса показывает максимальные напряжения Мизеса, вызванные действием суммарных статических и динамических нагрузок в вершине угла выработки.

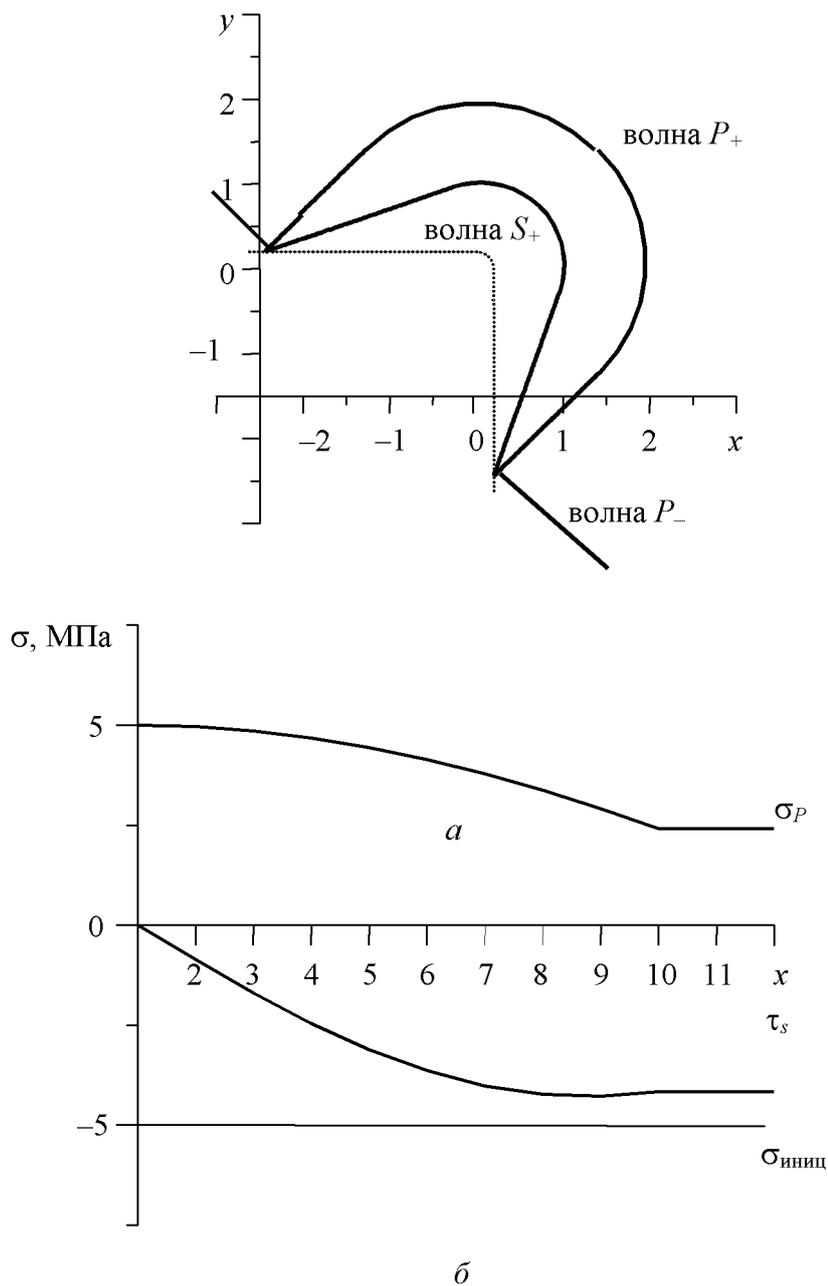


Рис. 1. Взаимодействие ударной волны со свободной поверхностью прямоугольной горной выработки: a – фронты падающей и отраженных волн; b – напряжение в узловых точках падающей и отраженных волн

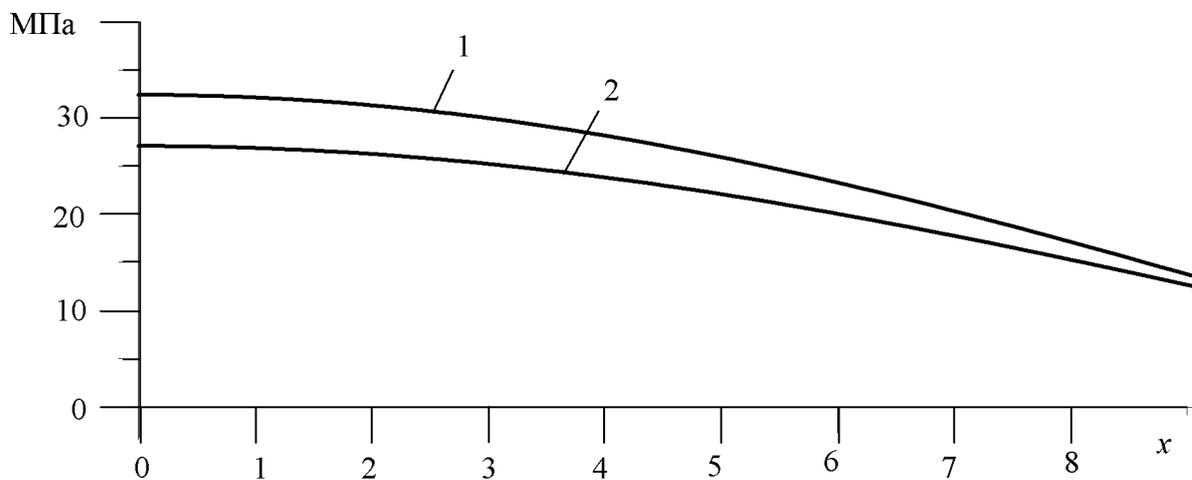


Рис. 2. Распределение напряжений по динамическому критерию Мизеса на свободном краю прямоугольной горной выработки: 1 – динамическая кривая Мизеса; 2 – статическая кривая Мизеса

Анализируя результаты, можно сделать вывод, что при проектировании креплений горных выработок в шахтах, опасных по горным ударам, необходимо вводить соответствующий динамический коэффициент.

1. *Chudek M.* Geomechanika z podstawami ochrony środowiska górniczego i powierzchni terenu. – Wyd. Pol. Sl., Gliwice. – 2002. – 638 s.

2. *Гуляев В. И., Луговой П. З., Иванченко Г. М., Яковенко Е. В.* Дифракция ударной волны на криволинейной поверхности раздела трансверсально-изотропных упругих сред // Прикл. математика и механика. – 2000. – 64, № 3. – С. 394–402.

3. *Lugovoy P. Z., Gouliayev V. I.* Propagation of shock wave fronts in anisotropic layered media. CP505, Shock Compression of Condensed Matter. – 1999 // Edited by M. D. Furnish, L. C. Chhabildas and R. S. Nixon // Proceeding of the Conference of the American Physical Society. – Snowbird, Utah, USA. – P. 1287–1290.

4. *Худек М., Гуляев В. И., Луговой П. З., Иванченко Г. М.* Лучевые методы в задачах распространения ударных волн в слоистых горных породах // XI Międzynarodowe Sympozjum GEOTECHNIKA–GEOTECHNICS 2004. – Materiały Naukowe. – Gliwice – Ustroń. – 2004. – Cz. II. – P. 29–40.

5. *Богачевский Э., Кравець В. Г., Луговой П. З.* Об устойчивости горных выработок при действии статических и динамических нагрузок // Матеріали Міжнародної конференції “Форум гірників–2006”. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. – 2006. – С. 33–40.