

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ ГОРНЫХ НАУК Том 4, № 2, 2017

УДК 622: 519.635.4

# ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ МНОГОШТРЕКОВОЙ ПОДГОТОВКЕ И ОТРАБОТКЕ ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА

### А.Б. Цветков, Л.Д. Павлова, В.Н. Фрянов

Сибирский государственный индустриальный университет, E-mail: atsvet@mail.ru, ул. Кирова, 42, 654007, г. Новокузнецк, Россия

Представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния геомассива при многоштрековой подготовке выемочного участка. Сопоставлены численные решения, полученные посредством нелинейной модели и с использованием определяющих соотношений теории упругости. Установлены закономерности распределения напряжений в окрестности целиков, расположенных в зоне опорного давления очистной выработки.

Численное моделирование, напряжения, угольный пласт, штрек, выемочный участок, целик

# DETECTION OF REGULARITIES OF GEOMECHANICAL STATE CHANGE IN ROCK MASS DURING MULTI-ENTRY PREPARATION AND MINING OF AN EXTRACTION BLOCK

#### A.B. Tsvetkov, L.D. Pavlova, V.N. Fryanov

Siberian State Industrial University, E-mail: atsvet@mail.ru, 42 Kirova Str., Novokuznetsk 654007, Russia

The results of numerical simulation of the stress-strain state in a rock block and surrounding mass mass under multi-entry preparation to mining are presented. The numerical solutions obtained by the nonlinear modeling and using the constitutive relations of the theory of elasticity are compared. The regularities of the stress distribution in the vicinity of the pillars located in the zone of the abutment pressure of are found.

Numerical modeling, stresses, coal seam, drift, excavation site, pillar

Разнообразные горно-геологические и горнотехнические условия залегания угольных пластов, схем и способов их отработки влияют на особенности проявления горного давления. Одним из таких существенных факторов является технологическая схема подготовки и отработки выемочного участка в пределах отдельного пласта или свиты пластов.

В настоящее время перспективной схемой является многоштрековая подготовка выемочных участков, что обеспечивает интенсификацию процессов проветривания, транспорта горной массы, выход людей в аварийных ситуациях. Существует несколько вариантов многоштрековой подготовки выемочных участков [1]. С учётом мирового опыта отработки угольных месторождений, а также склонных к самовозгоранию угольных пластов на шахтах Кузбасса, на практике проводят два или три штрека.

Для выявления закономерностей изменения геомеханического состояния углепородного массива при многоштрековой подготовке выемочного участка разработана двумерная модель углепородного массива. Расчетная область строилась на основе данных о выемочном участке пласта 26а мощностью 2.1 м, расположенного на глубине 363 м в условиях Байдаевского ме-

сторождения Кузбасса. Над пластом залегает слой неустойчивых углистых алевролитов (ложная кровля) мощностью 0.40 м, который обрушается одновременно с выемкой пласта. Соответственно вынимаемая мощность пласта при моделировании принята 2.50 м. Выше ложной кровли залегают переслаивающиеся алевролиты, песчаники, угольные пласты нерабочей мощности. Предел прочности пород при сжатии 28–31 МПа, мощность породных слоёв 1.0–14.0 м. Длина очистного забоя (лавы) принята равной 200 м, ширина вспомогательного и вентиляционного штреков – 6 м. Фрагмент расчетной схемы приведен на рис. 1.



Рис. 1. Фрагмент расчетной схемы выемочного участка

Для определения параметров напряженно-деформированного состояния углепородного массива использовались классические уравнения механики сплошной среды и разрешающие уравнения метода конечных элементов в вариационной постановке задачи.

В разработанной нелинейной математической модели осуществляется выбор физических уравнений, определяющих условия деформирования в зонах сдвижения пород и выполняется согласование внутренних граничных условий при переходе пород из упругого в упругопластическое, предельное и запредельное состояния [2, 3]. Посредством разработанных зависимостей, аппроксимирующих экспериментальные диаграммы «напряжения-деформации», учитывается различная сопротивляемость пород знакопеременным напряжениям в зонах растяжения и сжатия [4].

Природное гравитационное поле напряжений принято в виде [5]:

$$\sigma_{y} = \rho_{g} H ; \tag{1}$$

$$\sigma_x = \lambda / (\lambda + 2\mu) \rho_g H , \qquad (2)$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – горизонтальные и вертикальные напряжения в нетронутом гравитационном поле;  $\rho$  – плотность пород; g – гравитационная постоянная; H – глубина разработки;  $\lambda$ ,  $\mu$  – параметры Ламе.

Для проведения численных расчетов применялся разработанный комплекс проблемноориентированных программ, в библиотеку которого встроены определяющие соотношения обеих математических моделей, что позволило сопоставить полученные на их основе результаты (рис. 2–4, знак минус соответствует сжимающим напряжениям, плюс – растягивающим).

Распределения вертикальных напряжений, полученных при решении нелинейной задачи и краевой задачи теории упругости, сопоставлены на рис. 2.

Из анализа распределения напряжений следует, что наибольшие сжимающие напряжения наблюдаются в окрестности краевой части пласта на участке 300–303 м. В породах кровли над штреками величины сжимающих напряжений уменьшаются, а над целиками, наоборот, возрастают. Учет нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями приводит к сниже-

нию деформационных параметров пород в окрестности очистного выработанного пространства, штреков и целиков. Величины сжимающих вертикальных напряжений в зоне влияния очистного выработанного пространства, вспомогательного и вентиляционного штреков, полученные при решении нелинейной задачи меньше, чем при решении задачи теории упругости.



Рис. 2. Изолинии распределения вертикальных напряжений в окрестности очистного выработанного пространства

На рис. 3 приведены эпюры вертикальных напряжений в угольном пласте. Отношение максимумов величин сжимающих напряжений, полученных по результатам численного решения задачи теории упругости и нелинейной задачи для целика, расположенного между конвейерным и вспомогательным штреками, составляет 1.2, а для целика, расположенного между вспомогательным и вентиляционным штреками – 1.1. Для обоих решений характерно, что влияние очистной выработки в направлении от конвейерного штрека вглубь угольного массива снижается и достигает величины гравитационного напряжения в нетронутом массиве на расстоянии  $\approx 0.2H$  от вентиляционного штрека.

Из анализа эпюр напряжений следует, что наличие очистного выработанного пространства приводит к неравномерному распределению напряжений в угольном пласте. Величины коэффициента концентрации сжимающих напряжений, вызванных техногенным воздействием на геомассив, принимают максимальные значения в окрестности границы целика, примыкающего к конвейерному штреку, и составляют при решении краевой задачи теории упругости более  $3\rho g H$ , а нелинейной задачи – более  $2.5\rho g H$ .



Рис. 3. Эпюра вертикальных напряжений в угольном пласте: 1 – очистное выработанное пространство; 2 – конвейерный штрек; 3 – вспомогательный штрек; 4 – вентиляционный штрек

При решении задачи теории упругости отношение величин вертикальных напряжений в краевых частях целика, расположенного между конвейерным и вспомогательным штреками, составляет 1.5, а для целика, расположенного между вспомогательным и вентиляционным штреками 1.2. Для нелинейной задачи эти отношения равны 1.4 и 1.1 соответственно.

Повышение концентрации напряжений над целиком, примыкающим к конвейерному штреку, обосновывается тем, что он подвергается более интенсивному техногенному воздействию по сравнению с целиком, расположенным между вспомогательным и вентиляционным штреками.

Полученные закономерности позволяют рассматривать целик, расположенный между конвейерным и вспомогательным штреками, как концентратор потенциальной энергии. Так как величины вертикальных перемещений, вычисленные с учетом нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями над очистной выработкой, превышают в 2.5 раза вертикальные перемещения, полученные при решении краевой задачи теории упругости, то на границе целика, примыкающей к конвейерному штреку, в результате интенсивных техногенных воздействий высока вероятность дезинтеграция пород, что может привести к образованию трещин и разрушению крепи конвейерного штрека.

Графики распределения сжимающих вертикальных напряжений над кровлей штреков и угольных целиков, приведенные на рис. 4, характеризуются максимумами в угольном пласте и постепенным затуханием дополнительных вертикальных напряжений, вызванных техногенным воздействием, при удалении от него в направлении вмещающей толщи, что подтверждается уменьшением разницы напряжений на графиках 1–4 с напряжениями в нетронутом массиве ( $\rho g H$ ). Величины вертикальных напряжений в кровле пласта, полученные по результатам решения нелинейной задачи, на 10–15% меньше соответствующих напряжений, вычисленных при решении задачи теории упругости (графики 1, 2 и 3, 4 на рис. 4).



Рис. 4. Графики распределения вертикальных напряжений над кровлей штреков и целиков: 1, 2 – целик, примыкающий к конвейерному штреку; 3, 4 – целик, расположенный между вспомогательным и вентиляционным штреками; 5, 6 – вспомогательный штрек; 7, 8 – вентиляционный штрек

Над штреками формируются зоны разгрузки (графики 5–8 на рис. 4), в которых вертикальные напряжения меньше соответствующих напряжений в нетронутом массиве. В кровле вспомогательного штрека площадь зоны разгрузки почти в 2 раза меньше площади соответствующей зоны в кровле вентиляционного штрека. Величины вертикальных напряжений над штреками, полученные по результатам решения нелинейной задачи, также меньше соответствующих напряжений, вычисленных при решении задачи теории упругости (графики 5, 6 и 7, 8 на рис. 4). Однако в зоне разгрузки над вспомогательным штреком, непосредственно у кровли штрека, напряжения, полученные при решении нелинейной задачи, превышают напряжения, вычисленные в результате решения задачи теории упругости. Точка равенства напряжений расположена в кровле на расстоянии, равном половине ширины выработки (см. рис. 4).

Предложенный подход к численному моделированию позволил выявить следующие закономерности изменения геомеханического состояния углепородного массива при многоштрековой подготовке и отработке выемочных участков:

 в целике, удаленном от очистного выработанного пространства, величины сжимающих вертикальных напряжений меньше по сравнению с напряжениями в целике, граничащим с очистной выработкой;

 концентратором напряжений является целик, расположенный в зоне опорного давления очистной выработки;

 при удалении от очистного выработанного пространства характер распределения напряжений приближается к гравитационному полю;

 максимальное отличие напряжений, вычисленных при решении нелинейной задачи и теории упругости, наблюдается в областях с наибольшей концентрацией напряжений;

– площадь зоны разгрузки в кровле штреков, определенная по результатам решения нелинейной задачи, больше, чем по результатам решения задачи теории упругости.

Выявленные закономерности позволят обосновать при проектировании многоштрековой подготовки и отработки выемочных участков технологические решения, обеспечивающие эксплуатационную устойчивость горных выработок и угольных целиков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Korshunov G.I., Loginov A.K., Shik V.M., Artemiev V.B. Geomechanics in Coal Mines. Moscow: Gorn Delo, 2011. [Коршунов Г.И., Логинов А.К., Шик В.М., Артемьев В.Б. Геомеханика на угольных шахтах – М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 388 с., табл., ил. (Серия «Библиотека горного инженера», Т. 3 «Подземные горные работы», Кн. 6).]
- 2. Tsvetkov A.B., Pavlova L.D., Fryanov V.N. Nonlinear mathematical model of the geomechanical state of the carbonaceous rock mass, GIAB, 2015, no. 1, pp. 365–370. [Цветков А.Б., Павлова Л.Д., Фрянов В.Н. Нелинейная математическая модель геомеханического состояния углепородного массива // ГИАБ. 2015. № 1. С. 365–370.]
- 3. Tsvetkov A.B., Pavlova L.D. Identification of the laws of non-linear deformation of rocks under mining of a coal series, GIAB, No. 10, pp. 324–332. [Цветков А.Б., Павлова Л.Д. Выявление закономерностей нелинейного деформирования пород при отработке свиты угольных пластов // ГИАБ. – 2016. – № 10. – С. 324–332.]
- Tsvetkov A.B., Pavlova L.D., Fryanov V.N. Construction of the approximant of complete diagram for rock deformation, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, vol 56. (Available at: <u>http://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/45/1</u>)
- 5. Polukhin V.A., Kaloerov S.A., Future Y.B., Goryanskaya E.S. Stress State and Stability Control in Underground Excavations. Donetsk: Yugo-Vostok, 2002. (in Russian) [Полухин В.А., Калоеров С.А., Грядущий Ю.Б., Горянская Е.С. Управление напряженным состоянием породного массива и устойчивостью горных выработок Донецк: Юго-Восток, 2002. 304 с.]