УДК 622.83.551.252

Б.Ю.ЗУЕВ, *канд. техн. наук, заведующий лабораторией, zuev_bu@spmi.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

B.Yu.ZUEV, *PhD in eng. sc., laboratory head, zuev_bu@spmi.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРУДНООБРУШАЮЩЕЙСЯ КРОВЛЕ И В ОПОРНОЙ ЗОНЕ В ХОДЕ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАССИВА ПРИ ВТОРИЧНЫХ ОСАДКАХ

Физическое моделирование на эквивалентных материалах при применении новых разработанных датчиков напряжений позволяет исследовать геомеханические процессы в блочных структурах при их эволюции в ходе разработки угольных пластов в сложных горно-геологических условиях с помощью длинных очистных забоев. Результаты исследований могут быть использованы при выборе оптимальных параметров крепей.

Ключевые слова: эволюция блочных структур, труднообрушающаяся кровля, динамика изменения напряжений.

DYNAMICS IN CHANGE OF STRESSES IN HARDLY-CAVING ROOF AND IN A SUPPORTED ZONE IN THE COURSE OF EVOLUTION OF STRUCTURAL PARAMETERS OF ROCK MASS WITH SECONDARY SUBSIDENCE

Physical modeling on equivalent materials with the use of newly-developed stress sensors allows to investigate the geomechanical processes in blocky structures in their evolution during coal seam mining by long stoping faces under complicated geological-and-mining conditions. The results of investigations may be used in selection of optimal parameters of supports.

Key words: evolution of blocky structures, hardly-caving roof, dynamics in change of stresses.

При выемке пологих угольных пластов подземным способом на основе использования длинных очистных забоев возникают определенные трудности при наличии труднообрушающейся кровли. Обычно для обеспечения безопасности при первых осадках тяжелых кровель применяются дополнительные технические мероприятия: технологические (изменение длины забоев, порядка выемки угля и самих пластов, систем отработки и их варьирования); пассивные (изменение параметров крепей и их расстановки, изменение ширины призабойного пространства, использование закладки); активные (торпедирование кровли, принудительное обрушение, увлажнение и т.д.).

Однако и вторичные осадки тяжелых кровель существенно влияют на эффективность и безопасность горных работ. Поэтому исследование геомеханических процессов, происходящих при вторичных осадках тяжелых кровель, и в настоящее время является важной актуальной задачей, позволяющей обосновать выбор оптимальных параметров крепей [1].

Математические методы исследования подобных геомеханических процессов сталкиваются с серьезными проблемами при не-

обходимости учета эволюции структурных параметров блочно-слоистой кровли при выемке угольных пластов на больших площадях, связанных с динамикой формирования блоков-консолей, имеющей свою специфику в различных пластах кровли в зависимости от мощности, прочности пластов, расстояния от выработанного пространства. При этом даже в режиме установившегося шага обрушения при вторичных осадках длина блоков не является постоянной величиной, а имеет как детерминированную, так и случайную составляющую. Еще более сложный характер имеет формирование и изменение граничных условий для каждого из вновь образованных блоков при блочно-шарнирном характере взаимодействия при смещении, развороте или обрушении в выработанное пространство.

Учет этих факторов имеет большое значение при выборе параметров крепей. Большие успехи при исследовании подобных геомеханических процессов были достигнуты при моделировании на физических моделях из эквивалентных материалов (ЭМ). Однако долгое время полученная информация ограничивалась геометрическими параметрами блоками и их смещениями, так как методика измерений и параметры используемых датчиков не позволяли получать надежные результаты определения как статических, так и динамических напряжений в отдельных блочных структурах. Решить эту проблему позволили разработанная методика [2,3,4] и миниатюрные датчики напряжений (15×1,5 мм) типа МДГ-2 и МДГ-3 (авт. свид. № 3761414/24-10 и № 462113/10), практически не искажающие исследуемые геомеханически процессы и позволяющие получать надежные результаты измерений во всех используемых ЭМ в диапазоне от 0 до 5 кГц.

В статье приведены результаты исследования на физических моделях в масштабе 1:100 геомеханических процессов при выемке угольного пласта мощностью $m_{уг} = 3$ м на глубине 400 м при суммарной мощности почвы 30 м, кровли 70 м. Основная кровля представляет собой песчаник мощностью 10 м и прочностью 40 МПа. Выше расположены слои по 1,2-1,5 м. Таким образом, по фактору тяжести нагрузки кровля может быть классифицирована как трудноуправляемая. Датчики устанавливались в модели при ее изготовлении на горизонте, соответствующем средней части основной кровли через 2-3 м.

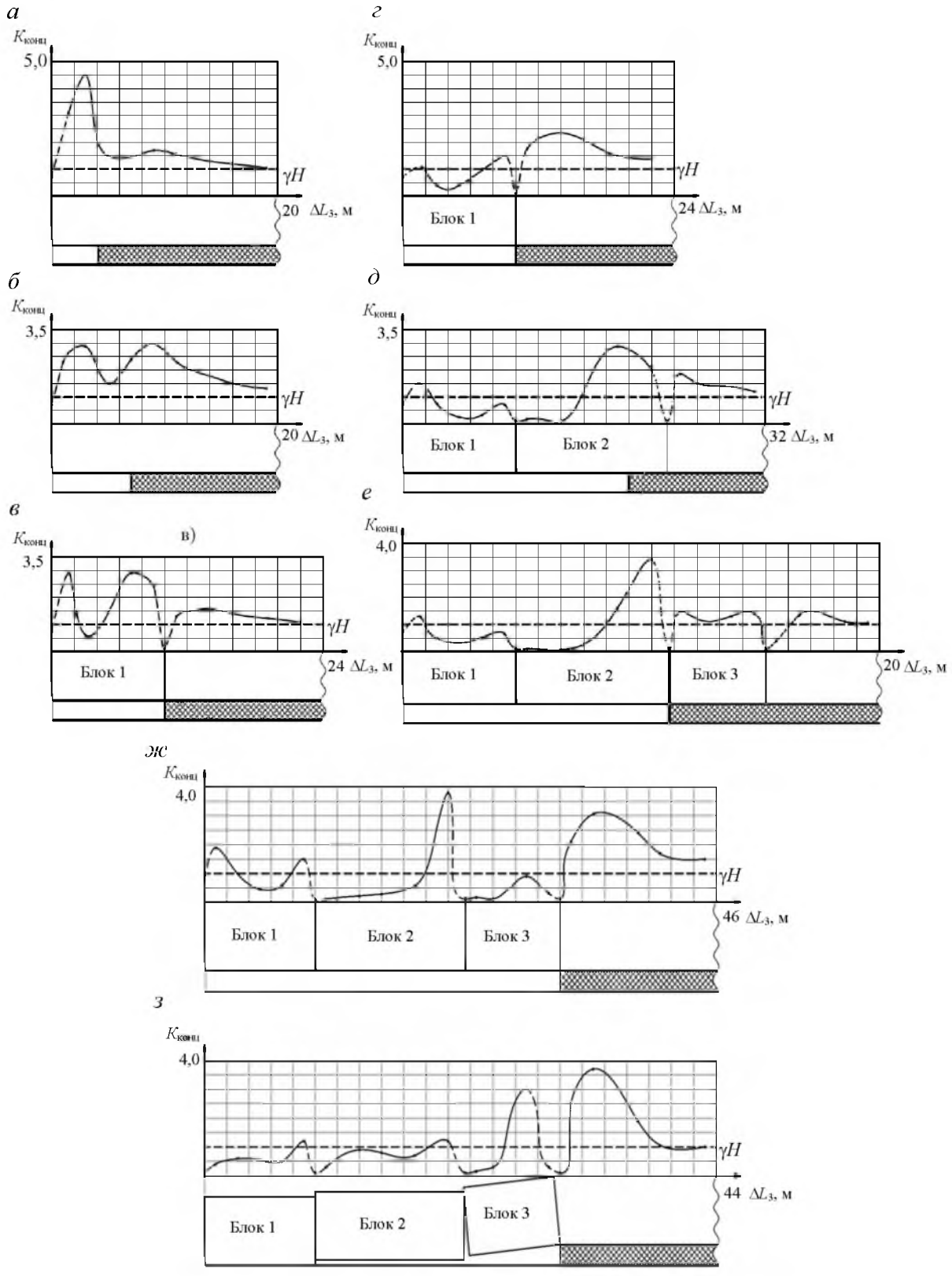
При моделировании выемки угольного пласта в кровле образовалась целая цепь зависших блоков, создающих значительный боковой распор, не позволяющий на первом этапе обрушиться в выработанное пространство и влияющий на распределение напряжений в кровле и опорной зоне выработки. В ходе дальнейшего подвигания забоя при пролете основной кровли $L = 50$ м произошла первичная осадка основной кровли. После этого в опорной зоне впереди забоя были зафиксированы повышенные концентрации напряжений, достигающие 4,5 γH на расстоянии $\Delta X = 3$ м (или 1,0 $m_{уг}$) от груди забоя, причем по мере увеличения ΔX до 19 м наблюдалось их снижение (до 1,05 γH) (см. рисунок, *а*).

При дальнейшем подвигании забоя ($\Delta L_з$) происходила подработка основной кровли с образованием зависающей консоли основной кровли длиной $L_к = \Delta L_з$. При увеличении $L_к$ до 6,7 м максимум опорного давления уменьшился до 2,9 γH и приблизился к поверхности обнажения до 2,3 м (0,77 $m_{уг}$), при этом напряжения на краю консоли составили 2,7 γH, в центре – 1,5 γH, над забоем – 2,3 γH (см. рисунок, *б*).

При $\Delta L_з = L_к = 10$ м в консоле появилась трещина по груди забоя и образовался блок основной кровли (Б1) длиной 10 м. Максимум опорного давления уменьшился до 1,6 γH и удалился от поверхности обнажения до 4,0 м (1,33 $m_{уг}$). Напряжения на краю Б1 практически не изменились – 2,7 γH , в средней части резко упали до 0,6 γH а области прилегания к груди забоя составили 2,4-2,8 γH (см. рисунок, *в*).

При $\Delta L_з = 12,7$ м максимум опорного давления увеличился до 2,4 γH, а напряжения в блоке Б1 упали в среднем в два раза (см. рисунок, *г*).

При дальнейшем подвигании забоя при $\Delta L_з = 20$ м в основной кровли впереди груди



Динамика изменения напряжений в труднообрушающейся кровле и в опорной зоне в ходе эволюции структурных параметров массива при вторичных осадках

забоя на расстоянии 3,5 м образовалась новая трещина и началось формирование блока 2 (Б2) длиной 13,5 м. В новой части опорной зоны основной кровли от трещины в глубину массива на протяжении 8 м напряжения уменьшались соответственно от 1,8 до 1,25 γH. В средней части блока Б1 напряжения увеличились на 0,15 γH, в его левой части увеличились на 0,42 γH,а в правой, наоборот, уменьшились на 0,8 γH. В левой и правой частях формирующегося блока Б2 напряжения составили, соответственно, 0,2 γH и 2,0 γH, а максимум концентраций напряжений оказался смещенным к его правой части и составил 2,8 γH (см.рисунок, *д*).

При $\Delta L_з = 23{,}5$ м блок Б2 оказался полностью подработанным и сформировавшимся в отдельную, но связанную с блоком Б1 и опорной зоной структуру. Одновременно с этим впереди груди забоя на 10 м образовалась третья трещина и началось формирование нового блока Б3. В новой части опорной зоны напряжения изменялись от 0,4 до 1,35 γH. В блоке Б1 напряжения практически не изменились, в блоке Б2 максимум напряжений увеличился до 3,4 γH и сместился вплотную к границе с Б3. В самом блоке Б3 напряжения оказались практически равномерно распределенными в диапазоне (1,2-1,45) γH (см.рисунок, *е*).

При дальнейшем подвигании забоя до правой границы Б3 ($\Delta L_з = 32$ м) в опорной зоне произошел резкий скачок максимума напряжений до 3,1 γH на расстоянии 3 м от груди забоя и до 1,5 γH на расстоянии 13 м. На границах Б1 напряжения выросли до 1,9 и 1,5 γH, в блоке Б2 на его границе с Б3 – до 3,8 γH, а в блоке Б3 упали до 0,1-0,9 γH с максимумом на его границе с опорной зоной (см. рисунок, *ж*).

При этом же положении забоя произошло частичное опускание в выработанное пространство блоков Б1 и Б2 и разворот блока Б3. Вследствие этого произошло увеличение максимума напряжений в зоне опорного давления от 3,1 до 3,7 γH, разгружение блоков Б1 и Б2 до 0,3-1,2 γH и резкий рост максимума напряжений в блоке Б3 – до 3,0 γH (см. рисунок, *з*).

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

• по мере подвигания забоя в мощной кровли образуются трещины, формирующие все новые и новые блоки, размеры и перемещение которых определяются сложным характером взаимодействия соседних блоков как блочно-шарнирной системы с переменными параметрами;

• разработанные датчики типа МДГ-2 и МДГ-3 обеспечивают получение информации о параметрах эпюр напряжений в опорной зоне, в каждом из блоков и динамику их изменения;

• большое количество вновь образуемых дискретных элементов в кровле массива и многообразие форм их взаимодействия требует учета вероятностно-статистических закономерностей при определении места образования трещин, размеров блоков, динамики изменения концентраций напряжений в опорной зоне и самих блоках и выделения как детерминированных, так и случайных составляющих;

• при анализе данной модели можно выделить ряд общих закономерностей, характерных для всего исследуемого геомеханического процесса:

– установлено, что на границах блоков существует большой перепад вертикальных составляющих напряжений – от 0,7 до 3,8 γH;

– как правило, экстремальные значения напряжений во всех блоках кровли смещены к краям, а средние значения – к их центру;

– при каждом подвигании забоя картины распределения напряжений существенно меняются и для анализа происходящих изменений необходимо привлечение дополнительных данных о смещении блоков и параметрах их взаимодействия.

Важными факторами, влияющими на распределение напряжений в блочных структурах и эффективность поддержания кровли, являются размеры и форма блоков, возникающие в породах кровли при проведении очистных работ. Было установлено, что при моделируемых параметрах кровли среднее значение длины блока основной кровли на 10 % превышает его высоту. Однако закон изменения длины блока носил вероятностно-статистический характер с колебаниями величины от 0,7 до 2,3 $h_{бл.}$ При этом 30 % всех блоков имели длину, равную 1,0-1,3 $h_{бл.}$

Полученные данные могут быть использованы при разработке математических методов расчета подобных геомеханических процессов для получения информации об эволюции структурных параметров блоков, граничных условий и напряжений внутри блочных структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Глушихин Ф.П.* Трудноуправляемые кровли в очистных забоях. М., 1970.

2. *Глушихин Ф.П.* Рекомендации по измерению напряжений в моделях из эквивалентных материалов / Ф.П.Глушихин, Б.Ю.Зуев, М.Ф.Шклярский / ВНИМИ. Л., 1985.

3. *Глушихин Ф.П.* Измерение напряжений в моделях из эквивалентных материалов / Ф.П.Глушихин, Б.Ю.Зуев, М.Ф.Шклярский, М.С.Злотников // Прогноз геомеханических процессов и управление горным давлением на шахтах: Сб. научн. тр. ВНИМИ. Л., 1985.

4. *Зуев Б.Ю.* Указания по эксплуатации микродинамометров для определения напряжений в мелкодисперсных средах. ВНИМИ. Л., 1989.

REFERENCES

1. *Glushikhin F.P.* Hardly-controllable roofs in stoping faces. M., 1970.

2. *Glushikhin F.P.* Recommendations on measurement of stresses in models from equivalent materials / F.P.Glushikhin, B.Yu.Zuev, M.F.Shklyarsky / VNIMI. Leningrad, 1985.

3. *Glushikhin F.P.* Measurements of stresses in models from equivalent materials / F.P.Glushikhin, B.Yu.Zuev, M.F.Shklyarsky, M.S.Zlotnikov // Proc. VNIMI «Prediction of geomechanical processes and rock pressure control at coal mines» / VNIMI. Leningrad, 1985.

4. Zuev B.Yu. Instruction for operation of microdynamometers for the determination of stresses in fine dispersion media / VNIMI. Leningrad, 1989.