2021

Nº 3

# ГЕОМЕХАНИКА

УДК 004.942:622.838.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ШАГАЮЩЕЙ КРЕПИ С МАССИВОМ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК

### В. И. Клишин<sup>1</sup>, В. Н. Фрянов<sup>2</sup>, Л. Д. Павлова<sup>2</sup>, С. М. Никитенко<sup>1</sup>, Ю. В. Малахов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, E-mail: klishinvi@icc.kemsc.ru, Ленинградский проспект, 10, 650065, г. Кемерово, Россия <sup>2</sup>Сибирский государственный индустриальный университет, E-mail: ld\_pavlova@mail.ru, ул. Кирова, 42, 654007, г. Новокузнецк, Россия

Предложена специальная передвижная шагающая крепь для проведения подземных выработок угольных шахт. Методом конечных элементов исследован процесс совместного деформирования элементов крепи и пород кровли выработки. Установлены форма и размеры зон предразрушения, влияние крепи на состояние угольного пласта и вмещающих его пород. Обоснована область применения шагающей крепи для проведения подготовительных выработок, а также необходимость разработки метода текущего прогноза динамических явлений в процессе ведения горных работ. Доказана возможность повышения темпов проведения подготовительных выработок за счет сокращения длительности проходческого цикла.

Метод конечных элементов, вычислительный эксперимент, передвижная крепь, напряжения, подготовительный забой, коэффициент остаточной прочности

DOI: 10.15372/FTPRPI20210301

Актуальность решения проблемы безопасной и эффективной отработки угольных месторождений полезных ископаемых возрастает по мере усложнения горно-геологических условий на новых лицензионных участках и горных отводах действующих шахт. Это связано как с необходимостью повышения уровня промышленной безопасности при подземной угледобыче, так и с растущей конкуренцией угольной продукции из-за тенденции к снижению рыночных цен на уголь [1].

Основными факторами, сдерживающими производительность очистных и подготовительных забоев угольных шахт, а также влияющими на безопасность горных работ, являются увеличение глубины разработки и связанные с этим процессы динамического проявления горного

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-17-01143-П).

давления и интенсификации выделения метана. Негативное влияние указанных факторов при подготовке и отработке газоносных угольных пластов на глубине более 400 м по традиционным геотехнологиям приводит к вынужденным остановкам забоев, необходимости реализации трудоемких профилактических мероприятий для обеспечения безопасных условий работы персонала и повышения темпов проходки подготовительных выработок. Это подтверждает актуальность метода текущего прогноза динамических явлений при ведении горных работ без остановки основных технологических процессов.

На современных отечественных и зарубежных угольных шахтах наблюдается диспропорция между темпами добычи готовых к выемке запасов угля при средней добыче из очистного забоя 4603 т/сут в 2019 г. [1] и их воспроизводства посредством выполнения подготовительных выработок в панелях с ограниченной скоростью 200–300 м в месяц. С переходом горных работ на глубину более 400 м возникла необходимость применения многоштрековой подготовки и отработки выемочных газоносных пластов, что привело к увеличению удельного объема проведения подготовительных выработок.

Один из вариантов компенсации указанных недостатков традиционных технологий воспроизводства готовых к выемке запасов угля на шахтах — повышение скорости проведения подготовительных выработок посредством применения средств дистанционной выемки угля и крепления пород кровли в подготовительных забоях без постоянного присутствия человека в опасных зонах [2].

#### ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для повышения темпов проведения подготовительных выработок за счет сокращения длительности проходческого цикла при дистанционном управлении процессами выемки угля и креплении пород в окрестности выработки в [3, 4] предложена конструкция передвижной ограждающей механизированной крепи (рис. 1).



Рис. 1. Многофункциональная шагающая механизированная крепь для скоростной проходки подземных горных выработок

Механизированная шагающая крепь состоит из двух секций, передовой и отстающей, соединенных между собой гидродомкратами передвижки. Каждая секция включает опорные балки, которые зафиксированы на двух траверсах через проставки, при этом каждая траверса жестко связана с двумя нормально ориентированными к ней распорными гидравлическими стойками. На гидравлических стойках каждой секции закреплены направляющие, которые образуют с гидравлическими стойками относительно жесткие рамы в плоскости бока выработки. Секции опираются через гидростойки и опоры на почву выработки.

Продвижение крепи осуществляется путем шагания в следующей последовательности:

— на первой стадии осуществляется передвижка передовой секции путем сокращения четырех распорных гидростоек секции. Траверсы с опорными балками передовой секции опускают на величину, равную проставкам, и кладут на траверсы отстающей секции. Заводят элементы металлической решетчатой затяжки, гидродомкрат передвижки продвигает передовую секцию на шаг передвижки. Выдвигают четыре гидравлические стойки передовой секции, при этом опорные балки передовой секции крепи прижимают металлическую решетчатую затяжку к кровле выработки;

— устанавливается система анкеров в хвостовой части шагающей крепи;

— на второй стадии выполняется передвижка отстающей секции путем сокращения четырех распорных гидростоек секции. Траверсы с опорными балками отстающей секции опускают на величину, равную проставкам, и кладут на траверсы передовой секции. Гидродомкратом передвижки подтягивают отстающую секцию на шаг передвижки и выдвигают четыре гидравлические стойки отстающей секции, опорные балки секции прижимаются к кровле выработки.

Далее цикл повторяется. На рис. 2 представлен состав технологического оборудования добычного комплекса, в который включены: проходческий комбайн с режущим органом избирательного действия, механизированная шагающая крепь, буровой станок с анкероустановщиком, транспортное средство (телескопический ленточный конвейер, перегружатель, самоходный вагон).



Рис. 2. Проходческий комплекс для скоростной проходки: *1* — проходческий комбайн; *2* — механизированная шагающая крепь; *3* — буровой станок с анкероустановщиком; *4* — перегружатель

Наименее изученными в системе "крепь – вмещающие выработку породы" являются процессы совместного деформирования элементов крепи и пород кровли для обеспечения устойчивости выработки при передвижке секций. Методы моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом взаимодействия конструктивных элементов горного оборудования и пород описаны в [5–9].

В настоящей работе для исследования взаимодействия системы "крепь – вмещающие выработку породы" решалась краевая задача Дирихле с граничными условиями 1-го рода. Постановка задачи следующая: для ограниченной области исследований  $\Omega$ , размеры которой по оси *z* значительно больше размеров в плоскости *xy*, найти компоненты смещений и напряжений для каждой точки внутри области. Использовалась математическая модель, сформулированная на основе классических уравнений теории упругости для условий плоской деформации [10]:

уравнений равновесия

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - q = 0;$$

геометрических уравнений

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x};$$

физических уравнений

$$\varepsilon_{x} = \frac{1}{E} [(1-\mu^{2})\sigma_{x} - \mu(1+\mu)\sigma_{y}], \quad \varepsilon_{y} = \frac{1}{E} [(1-\mu^{2})\sigma_{y} - \mu(1+\mu)\sigma_{x}], \quad \gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E}\tau_{xy},$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{yx}$  — компоненты напряжений;  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\gamma_{xy}$  — компоненты деформаций; q — объемный вес пород;  $\mu$  — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости.

Граничные условия 1-го рода определяются следующим образом:

— на боковых границах модели задаются горизонтальные компоненты смещений  $u|_{0} = 0$ ;

— на нижней границе модели задаются вертикальные и горизонтальные компоненты смещений  $u|_{\Omega} = 0$ ,  $v|_{\Omega} = 0$ .

Представленная задача решается методом конечных элементов. Граничные условия учитываются на этапе сборки матриц — из них вычеркиваются строки и столбцы, соответствующие граничным узлам, в которых значения компонент смещений известны.

Внутри области соблюдается условие, что на каждую точку исследуемой области равномерно действует гравитационное поле напряжений  $\gamma H$ , отражающее действие веса пород. Контур выработки формируется координатами вершин многоугольника, в пределах которого модуль упругости и плотность пород принимаются равными нулю. Распор опорных балок секции крепи в кровле и почве выработки задается в виде сосредоточенной силы, которая приложена к вершинам конечных элементов, находящихся на балках.

Для моделирования приняты следующие горно-геологические и горнотехнические условия: глубина расположения выработки 500 м; ширина выработки 5 м, ее высота 3 м; угол падения пласта до 15°; мощность пласта 3 м; распор механизированной крепи 600–3000 кН на 1 метр длины выработки. Свойства угольного пласта средней мощности и боковых пород представлены в табл. 1.

Расчет параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород, вмещающего горную выработку, осуществляется путем последовательного выполнения нескольких этапов. На первом этапе на основе алгоритма метода конечных элементов определяется упругое решение для нахождения компонент смещений и напряжений.

Литотип породных слоев	Мощность слоя, м	Расстояние от кровли пласта, м	Предел прочности при сжатии, МПа	Количество подслоев в модели, шт.
Основная кровля, мелкозернистый	30.0	2.4	55	7
алевролит				
Непосредственная кровля, аргиллит	2.0	0.4	30	5
Ложная кровля, аргиллит	0.4	0.0	25	2
Угольный пласт	3.0	3.0	10	15
Ложная почва, аргиллит	0.2	3.2	20	2
Непосредственная почва, аргиллит	3.7	6.7	35	3
Основная почва, алевролит	28.0	31.0	50	8

ТАБЛИЦА 1. Свойства угольного пласта и вмещающих его пород

На следующем этапе исследуется состояние массива горных пород, которое характеризуется нелинейной зависимостью между нормальными и касательными напряжениями в зоне влияния горной выработки. На основе критерия прочности Кулона–Мора в каждом конечном элементе вычисляется коэффициент остаточной прочности угля или пород

$$k_o = \frac{\tau_{\text{пред}}}{\tau_{\text{MK}\Im}},$$

где  $au_{\text{пред}}$  — предельные касательные напряжения;  $au_{\text{MK} \ni}$  — касательные напряжения, полученные по результатам численного моделирования.

Согласно теории прочности Мора, разрушение породы определяют соотношением касательных и нормальных напряжений в случае превышения ими предельных значений. Огибающие предельных кругов напряжений можно описать параболической зависимостью [11]:

$$\tau_{\text{пред}} = \left\{ (\sigma_r - \sigma) \left[ 2\sigma_r - 2\sqrt{\sigma_r(\sigma_r - \sigma_c)} + \sigma_c \right] \right\}^{0.5}$$

здесь  $\sigma$  — нормальные напряжения в породном слое или угольном пласте, находящемся в сложнонапряженном состоянии;  $\sigma_c$ ,  $\sigma_r$  — пределы прочности угля или породы при сжатии и растяжении соответственно.

На основе коэффициента остаточной прочности находятся границы зон поврежденных и обрушенных пород. В конечных элементах, расположенных в этих зонах, модуль упругости изменяется на секущий модуль деформации:  $E_d = k_o E$ .

На заключительном этапе реализуется нелинейное решение [12], в котором модифицируются локальные матрицы жесткости конечных элементов в зависимости от секущих модулей деформации пород, строится глобальная матрица жесткости и выполняется повторный расчет с использованием стандартных процедур метода конечных элементов.

Вычислительные эксперименты проводились с использованием авторского комплекса программ [13] для различных схем расположения опорных балок при передвижке и распоре секций крепи, изменении давления секций крепи на кровлю и почву выработки, а также для различных вариантов формы и размеров поперечного сечения пластовой выработки. Оценка результатов моделирования осуществлялась на основе анализа закономерностей распределения вертикальных и горизонтальных смещений, напряжений, коэффициента остаточной прочности угля и пород в окрестности выработки. В качестве базового варианта принята подготовительная выработка, пройденная на горизонтальном пласте при отсутствии крепи.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Схема поперечного сечения горной выработки, пройденной по наклонному пласту средней мощности, и расположения нагрузочных элементов шагающей крепи, с помощью которых задается давление на кровлю ( $P_1$ ,  $P_2$ ,...,  $P_6$ ) и почву ( $Q_1$ ,  $Q_2$ ), представлена на рис. 3. Проведено численное моделирование трех вариантов работы механизированной крепи: с полным распором (3000 кН/м длины выработки) всех опорных балок (рис. 3*a*); с частичным распором (1500 кН/м длины выработки) при передвижке секций крепи с поддержанием кровли с помощью трех опорных балок (рис. 3*б*); с частичным распором (1000 кН/м длины выработки) при передвижке секций крепи с помощью двух центральных опорных балок (рис. 3*в*).



Рис. 3. Изолинии распределения вертикальных (*a*, *б*) и горизонтальных (*в*) напряжений в окрестности выработки

По результатам численного моделирования установлено, что при полном распоре секций крепи по сравнению с распором при ее передвижке вертикальные смещения пород кровли уменьшаются в 1.3 раза, горизонтальные — в 1.2 раза.

Представленные результаты распределения вертикальных и горизонтальных напряжений (знак "–" соответствует сжимающим напряжениям, знак "+" — растягивающим) подтверждают положительное влияние шагающей механизированной крепи, так как в породах кровли отсутствуют растягивающие напряжения, т. е. снижается риск их обрушения. Воздействие распора элементов крепи распространяется на высоту 0.5-1.5 м от кровли выработки в виде зоны уплотнения пород непосредственно над крепью. Отметим, что неравномерное давление секций крепи на породы кровли при передвижке секций может приводить к формированию блочной структуры и местным вывалам породных блоков между опорными балками, поэтому применение решетчатой затяжки является обязательным.

Максимальные концентрации вертикальных и горизонтальных напряжений проявляются на пересечении кровли и почвы выработки с ее боками. Давление гидростоек на почву выработки способствует появлению в ней знакопеременных вертикальных напряжений: под стойками сжимающих, а в середине выработки растягивающих вертикальных напряжений. Горизонтальные напряжения в породах почвы сжимающие. Сочетание знакопеременных напряжений в породах почвы приводит к разрушению и пучению пород почвы на глубину до 1 м. Растягивающие горизонтальные напряжения возникают в боках выработки (рис. 3 $\theta$ ). С увеличением угла падения пласта с 0 до 15° напряжения изменяются несущественно, однако возрастает асимметричность графиков распределения напряжений с отклонением оси симметрии в сторону падения пласта.

Наиболее важный геомеханический параметр, характеризующий устойчивость пород в окрестности подготовительной выработки, — коэффициент остаточной прочности  $k_o$ . На рис. 4 показаны изолинии распределения коэффициента остаточной прочности, позволяющие оценить изменение формы и размеров зон предразрушения угля и пород (пунктирная линия соответствует границе зоны предразрушения). По результатам шахтных наблюдений состояния кровли и угольного пласта на контуре выработки установлено, что зона поврежденных пород соответствует значению коэффициента остаточной прочности в диапазоне  $0.5 < k_o \le 0.7$ , а зона разрушения —  $0 < k_o \le 0.5$ .

На основе анализа формы и размеров зон предразрушения краевой части пласта в боках выработки, пород кровли и почвы определена асимметричность формы зоны предразрушения пород кровли, которая возрастает при увеличении угла падения пласта. Максимальная высота зоны предразрушения перемещается в сторону падения пласта, что следует учитывать при выборе оптимального дифференцированного распора балок в секциях крепи. Аналогичная закономерность формирования зоны предразрушения на наклонном пласте (рис. 4a,  $\delta$ ) по сравнению с выработкой, пройденной на горизонтальном пласте (рис. 4e), выявлена и в породах почвы.

Влияние нагруженных опорных балок приводит к уплотнению пород кровли на высоту до 0.5 м. Установлено формирование локальных зон уплотнения пород кровли над каждой балкой, а при передвижке секций крепи — между балками возникновение участка разрушения пород  $(k_0 \le 0.5)$ . Давление гидростоек на почву по бокам выработки создает формирование локальных концентраторов напряжений (см. рис. 3), зон разрушения или уплотнения пород (рис. 4).



Рис. 4. Изолинии распределения коэффициента остаточной прочности угля и пород в окрестности выработки: a — пройденной по наклонному пласту при полном распоре балок;  $\delta$  — пройденной по наклонному пласту при передвижке секций механизированной крепи с поддержанием кровли с помощью трех опорных балок; s — пройденной по горизонтальному пласту при передвижке секций механизированной крепи с поддержанием кровли с помощью двух центральных опорных балок

В краевой части пласта в боках выработки, независимо от начального распора и расположения балок, возникает зона разрушения угля глубиной до 0.5 м. Отжим угля с боков выработки может привести к травмированию персонала, поэтому рекомендуется конструкцию механизированной крепи дополнить противоотжимными устройствами.

Отметим, что при численном моделировании распор опорных балок задавался в виде сосредоточенных сил к вершинам конечных элементов и не учитывались особенности конструкции механизированной крепи. Согласно [14–16], основными параметрами механизированных крепей являются податливость и несущая способность. Результаты численного моделирования геомеханических процессов в окрестности выработки, представленные на рис. 3, 4, использованы для определения податливости и несущей способности механизированной крепи в подготовительном забое с учетом ее полного и частичного распора при передвижке секций.

Податливость и нагрузку на секцию крепи можно оценить модулем деформации крепи [16]:

$$E_k = \frac{hP_k}{S\Delta h},$$

где  $E_k$  — модуль деформации крепи, кН/м<sup>2</sup>; h — высота выработки, м;  $P_k$  — нагрузка на секцию крепи, кН; S — площадь перекрытия механизированной крепи, м<sup>2</sup>;  $\Delta h$  — податливость крепи, м.

При численном моделировании нагрузка на опорные балки секции передвижной механизированной крепи высотой 3 м принималась равной 3000, 1500 и 1000 кН (табл. 2). В период передвижки секции крепи ее модуль деформации снижается, однако значения конвергенции кровли и почвы для рассматриваемого варианта допустимы, что подтверждается практикой и нормативными документами [17, 18].

Вариант распора крепи	Нагрузка на крепь, кН	Площадь несущего перекрытия, м <sup>2</sup>	Конвергенция кровли и почвы, м	Модуль деформации крепи, кН/м <sup>2</sup>
Полный распор	3000	27.8	0.140	2312
Передвижка секций с распором трех балок	1500	14.9	0.150	2013
Передвижка секций с распором двух балок	1000	9.3	0.168	1920
Без крепи	0	0	0.220	0

ТАБЛИЦА 2. Результаты моделирования и расчета модуля деформации механизированной крепи

#### выводы

Установлено положительное влияние крепи на устойчивость кровли и почвы подготовительной выработки, заключающееся в отсутствии в них растягивающих напряжений. Обоснована по геомеханическим факторам возможность применения шагающей механизированной крепи при комбайновом проведении подготовительных выработок на наклонных пластах. Предложенный методический подход количественного обоснования геомеханических параметров взаимодействия элементов сложной системы "механизированная крепь – вмещающие выработку породы" рекомендуется для выбора оптимальных параметров технологии выемки угля, крепления пород кровли и обеспечения безопасности работ в сложных горно-геологических условиях угольных шахт.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- **1.** Таразанов И. Г., Губанов Д. А. Итоги работы угольной промышленности России за январь–декабрь 2019 г. // Уголь. 2020. № 3. С. 54–69.
- 2. Fryanov V. N. and Pavlova L. D. Simulation modeling and tracing optimal trajectory of robotic mining machine effector, IOP Conf. Ser.: Earth and Env. Sci., 2017, Vol. 53, No. 1. P. 1–7.

- 3. Klishin V. I., Opruk G. Yu., Pavlova L. D., and Fryanov V. N. Active prefracture methods in top coal caving technologies for thick and gently dipping seams, J. Min. Sci., 2020, Vol. 56, No. 3. P. 395–403.
- 4. Пат. РФ RU2739010, МПК E21C (41/00), E21D (23/00). Способ проведения подготовительной горной выработки и механизированная крепь для его осуществления / В. И. Клишин, Б. А. Анферов, Л. А. Кузнецова, С. М. Никитенко, Ю. В. Малахов, С. Н. Мефодьев, И. А. Шундулиди // Опубл. в БИ. 2020. № 36.
- 5. Серяков В. М. О методе расчета напряженного состояния горных пород с учетом особенностей их контактного взаимодействия с крепью выработок // ФТПРПИ. 2016. № 5. С. 23–29.
- 6. Клишин С. В., Клишин В. И. Исследование взаимодействия пакерных уплотнителей со скважиной при проведении гидроразрыва угольного пласта // ФТПРПИ. 2020. № 4. С. 48–58.
- 7. Yasitli N. E. and Unver B. 3D numerical modelling of stresses around a longwall panel with top coal caving, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 2005, Vol. 105. P. 287–300.
- Mustafa E. Yetkin, Ahmet T. Arslan, M. Kemal Özfırat, Bayram Kahraman, and Hayati Yenice. Numerical modelling of stress-strain analysis in underground thick coal mining, Int. J. Eng. Res. Technol., 2018, Vol. 7, Issue 04. — P. 199–204.
- **9. Medhurst T., Rankine R., and Kelly M.** Development of a method for longwall top coal caveability assessment, 14<sup>th</sup> Coal Operators' Conf., Austral. Inst. Min. Metall. Mine Managers Association of Australia, 2014. P. 42–50.
- **10. Безухов Н. И.** Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высш. шк., 1968. 512 с.
- 11. Проскуряков Н. М. Управление состоянием массива горных пород. М.: Недра, 1991. 368 с.
- 12. Фадеев А. В. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987. 221 с.
- 13. Св-во о регистрации программы для ЭВМ № 2020618595. Программный комплекс для моделирования геомеханических процессов в структурно неоднородном геомассиве при взаимном влиянии системы подземных горных выработок / В. Н. Фрянов, Л. Д. Павлова, А. Б. Цветков; ФГБОУ ВО Сиб. гос. индустр. ун-т, Фед. служба по интеллект. собств.; дата регистрации 30.06.2020 г.
- **14.** Эксплуатация механизированных крепей и пути их совершенствования / под ред. С. Т. Кузнецова. М.: Недра, 1976. 188 с.
- **15. Коровкин Ю. А., Савченко Π. Φ.** Теория и практика длиннолавных систем. М.: Горн. дело, 2012. 808 с.
- 16. Абдугалиева Г. Б., Бейсембаев К. М., Жетесов С. С., Жолдыбаева Г. С., Искаков М. М., Мальбаев Н. С., Шманев А. Н. Совершенствование методических подходов к расчету нагруженности крепей // ГИАБ. 2011. № 7. С. 5–11.
- 17. Юнкер М. Контроль кровли в пластовых выработках. М.: Горн. дело, 2015. 680 с.
- **18.** Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах. М.: Горн. дело, 2011. 216 с.

Поступила в редакцию 24/III 2021 После доработки 23/IV 2021 Принята к публикации 24/V 2021