

И.А. Турбор, Д.Н. Шурыгин

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ С УГЛЕПОРОДНЫМ МАССИВОМ

Аннотация. Усовершенствована упругопластическая модель взаимодействия механизированной крепи очистного забоя с углепородным массивом, позволяющая в зависимости от свойств вмещающих пород разрабатывать схемы передвижки секций механизированной крепи для сложных горно-геологических условий отработки угольных пластов на больших глубинах. Установлено, что с увеличением анизотропии вмещающих горных пород, когда значение модуля Юнга в горизонтальном направлении в два раза больше, чем в вертикальном, горизонтальные растягивающие напряжения в пять раз больше, чем вертикальные растягивающие напряжения. Основными факторами для обоснования схемы передвижки механизированной крепи являются протяженность зоны влияния технологических операций выемки угля и передвижки секций, а также геомеханические процессы, происходящие в горном массиве.

Ключевые слова: очистной забой, упругопластическая модель, анизотропия, механизированная крепь, горный массив.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-94-99

Введение

Характеризуя состояние дел в угольной промышленности, сложившееся в настоящее время, можно отметить ряд позитивных изменений, касающихся производственной деятельности предприятий. Важнейшим рычагом повышения эффективности угледобычи всегда была концентрация горных работ. Главная ее цель — уменьшение количества низконагруженных лав и ввод в действие высоконагруженных очистных забоев, укомплектованных современным производительным оборудованием.

Анализ современных тенденций развития средств и технологий выемки тонких и средней мощности угольных пластов в сложных горно-геологических условиях на больших глубинах показал, что современные технологии выемки и механизированные комплексы не обес-

печивают достаточную производительность очистного забоя без снижения уровня безопасности работ [1–4]. Поиск перспективных технических решений должен ориентироваться не только на модернизацию существующих гидравлических крепей, но и на создание принципиально новых средств крепления очистных забоев [5–9]. Анализ принципа работы механизированной крепи [10] и схем ее передвижки в очистном забое [11–12] указывает на тот факт, что при формализации и идентификации технологических параметров с целью оценки надежности производственного процесса в стабильном режиме необходимо включать параметр, учитывающий физико-механические и прочностные свойства вмещающих пород с целью минимизации проведения нерегламентированных работ при передвижке

секций механизированной крепи. Для решения практических вопросов в области надежности технологических схем выемки угля необходимы критерии, с помощью которых можно количественно оценить уровень надежности очистных забоев, оборудованных выемочными и транспортными машинами и механизмами, а также гидрофицированными крепями. Существующие методы исследования надежности горнодобывающих технологий и производственных процессов не удовлетворяют требованиям практики и уровню технологии горного производства. В обзорах о состоянии исследований надежности за последние годы отмечается неудовлетворенность существующими методами исследования надежности, поскольку прогнозные оценки и реальные значения показателей надежности имеют значительные расхождения.

Теория вопроса

Основными показателями, характеризующими взаимодействие крепи с кровлей, являются абсолютная величина и характер конвергенции вмещающих пород, уровень контакта перекрытия крепи с непосредственной кровлей и фактические рабочие характеристики механизированной крепи.

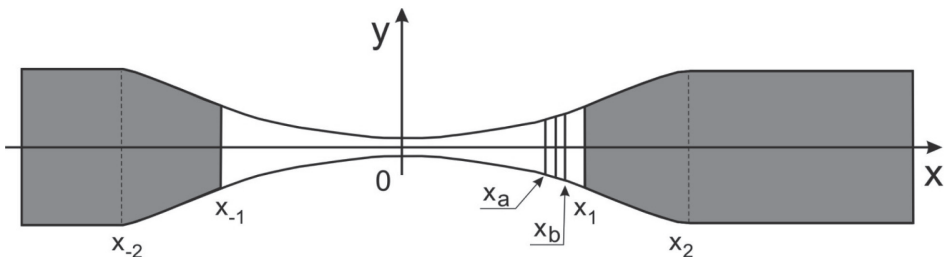
Неправильный выбор механизированной крепи для горно-геологических условий очистного забоя приводит к росту конвергенции вмещающих пород при заниженных рабочих характеристиках

как крепи либо к раздавливанию нижнего слоя непосредственной кровли пласта при завышенных характеристиках механизированной крепи. Вследствие этого возникают растягивающие напряжения в нижних слоях непосредственной кровли, которые приводят к раскрытию трещин и вывалообразованиям в призабойном пространстве лавы.

Массив горных пород с разрабатываемым угольным пластом представляет собой анизотропную упругопластическую среду. Рассмотрим начальную стадию разработки угольного пласта до смыкания пород кровли и почвы (рисунок). Ось x декартовой системы координат направлена по пласту перпендикулярно линии очистного забоя, ось y — перпендикулярно пласту в сторону дневной поверхности. За начало координат принимается середина выработанного пространства. Вблизи забоя угольный пласт находится в неупругом состоянии. Часть выработанного пространства на участке $[x_a, x_b]$ закреплена. Координаты краевой части пласта x_{-1} и x_1 . Границы зон призабойных пластических деформаций — x_{-2} и x_2 . Естественное напряженное состояние пород вызвано их весом и выражается формулами:

$$\begin{aligned}\sigma_x^{(0)} &= -\gamma(H - y); \\ \sigma_y^{(0)} &= -\lambda\gamma(H - y); \\ \tau_{xy}^{(0)} &= 0,\end{aligned}\quad (1)$$

где γ — удельный вес горных пород; λ — коэффициент бокового распора; H — глубина разработки.



Расчетная схема для стадии разработки угольного пласта
Coal mining stage design model

После того как часть угольного пласта была удалена, происходит перераспределение напряжений в угольном пласте и вмещающих породах. Представим возникающие компоненты напряжений в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_x^{(0)} + \sigma_x^{(1)}; \\ \sigma_y &= \sigma_y^{(0)} + \sigma_y^{(1)}; \\ \tau_{xy} &= \tau_{xy}^{(0)} + \tau_{xy}^{(1)},\end{aligned}\quad (2)$$

где $\sigma_x^{(1)}, \sigma_y^{(1)}, \tau_{xy}^{(1)}$ — дополнительные напряжения.

Дополнительное поле напряжений находится из граничных условий. Так как в области выработанного пространства при $x_{-1} < x < x_a$ и $x_b < x < x_1$ отсутствуют нормальные и касательные напряжения, то

$$\sigma_y = 0, \quad \tau_{xy} = 0, \quad y = 0. \quad (3)$$

На закрепленном участке при $x_a < x < x_b$ рабочее сопротивление крепи распределено по линейному закону:

$$\sigma_y = -R + px, \quad \tau_{xy} = 0, \quad y = 0. \quad (4)$$

где R, p — коэффициенты реакции крепи.

При $y = 0$ касательные напряжения равны нулю, то есть удовлетворяются граничные условия для τ_{xy} .

Методы анализа

Поставленная задача решается методом интегралов Коши для полуплоскости. В неупругой зоне угольного пласта определяем вертикальные и касательные напряжения, которые имеют вид:

$$\begin{aligned}\sigma_y &= -\gamma H(ax/h + c), \quad \tau_{xy} = 0, \\ x_1 &< x < x_2, \quad y = 0, \\ \sigma_y &= -\gamma H(-ax/h + c), \quad \tau_{xy} = 0, \\ x_{-2} &< x < x_{-1}, \quad y = 0,\end{aligned}\quad (5)$$

где

$$a = k / \gamma H;$$

$$c = k / \gamma H(\pi h / 2 - x_1)$$

k — прочность угля при сдвиге.

Таким образом, граничные условия для компонент дополнительных напряжений запишутся в виде:

$$\sigma_y^{(1)} = \begin{cases} yH, & x_{-1} < x < x_a, \quad x_b < x < x_1; \\ yH - \gamma H(ax/h + c), & x_1 < x < x_2; \\ yH - \gamma H(-ax/h + c), & x_{-2} < x < x_{-1}; \\ yH - R + px, & x_a < x < x_b. \end{cases} \quad (6)$$

Присутствие крепи приводит к перераспределению напряжений и изменению длины пластической зоны. Длина пролета пород до первичной посадки основной кровли в лаве при наличии крепи незначительно возрастает. Аналитические методы теории упругости позволяют определить напряженно-деформированное состояние массива при разработке угольного пласта и различных технологических условиях. Расчеты можно провести для разнообразных свойств вмещающих пород и технологических параметров ведения очистных работ. Это позволяет определить способы управления горным давлением и породами для оптимизации добычи полезных ископаемых.

Обсуждение результатов

Численные исследования проводились для условий: глубина залегания $H = 1000$ м, мощность пласта 1 м. Вмещающие породы считаются анизотропными. В качестве боковых пород принят к расчету песчанистый сланец: модули Юнга $E_1 = 3 \cdot 10^5$ Па, $E_2 = 7 \cdot 10^5$ Па, модули сдвига $G_1 = G_2 = 2 \cdot 10^5$ Па, прочность $\sigma_{раст} = 1,2 \cdot 10^7$ Па, $\sigma_{сж} = 9 \cdot 10^7$ Па. Реакция крепи в точке $x_b = 0,04\gamma H$, коэффициент $p = 78$ кПа/м. Исследования до первичной посадки кровли осуществлялись для $x_1 = 5$ м и $x_{-1} = 32$ м.

Расчеты показали, что влияние крепи распространяется на расстояние до 4 м. Величина прогиба пород на расстоянии 1 м от выработанного пространства

составляет около 60% от прогиба пород над выработкой, величина прогиба пород над крепью — до 30%. Анализ полученных результатов показал, что в кровлю и почву пласта на расстоянии 5–10 м в обе стороны распространяется зона растягивающих горизонтальных напряжений. Возникающие горизонтальные деформации в породах кровли вблизи выработки могут превысить предел прочности, что приведет к образованию трещин и вывалам пород.

Таким образом, получено новое аналитическое решение, позволяющее с учетом свойств вмещающих пород и технологии ведения очистных работ, разрабатывать рекомендации для управления кровлей пласта. Анализ полученных численных результатов показал, что напряжения в призабойной зоне возрастают по абсолютной величине по мере удаления от груди забоя в глубь массива и могут превысить предел прочности породы.

Анализ результатов шахтных наблюдений позволил подтвердить, что характер опускания кровли в выработанном пространстве очистного забоя может быть описан S-образной кривой, один конец которой расположен на целике угля, а другой на обрушенных породах. Авторами было установлено, что при достаточном удалении комбайна от замерной станции скорость опускания кровли составляла около 0,02–0,05 мм/мин и не зависела от его положения в лаве. Однако при приближении его к замерной станции на расстояние, около 10–15 м, скорость опускания кровли начала быстро увеличиваться. Наибольшее ее значение наблюдалось в период прохода комбайном замерной станции. Далее по мере удаления комбайна от замерной станции скорость опускания кровли начала убывать.

Отрезок пути комбайна до замерной станции, на котором начинали резко возрастать скорости опускания кровли

представляет собой зону влияния процесса выемки угля впереди комбайна. Аналогичный отрезок пути наблюдается при удалении комбайна от замерной станции, на котором скорость опускания кровли снижалась до уровня, который предшествовал началу влияния выемки. Этот отрезок представляет собой зону влияния выемки угля позади комбайна. Отмеченные изменения интенсивности опускания кровли наблюдались при каждом проходе комбайна в районе замерной станции. В периоды между проходами комбайна интенсивность опускания кровли стабилизировалась на уровне 0,02–0,05 мм/мин и практически не зависела от длительности этого периода.

Заключение

Установлено, что в области свободного зависания кровли породы находятся в разгруженном состоянии. Чем сильнее анизотропия пород, тем больше величина растягивающих горизонтальных напряжений. С увеличением анизотропии вмещающих горных пород (соотношение значений модуля Юнга в горизонтальном E_x и вертикальном E_y направлениях $E_x/E_y = 2$) горизонтальные растягивающие напряжения в 5 раз превышают вертикальные растягивающие напряжения. Наличие крепи приводит к уменьшению прогиба пород. Влияние крепи распространяется на расстояние до 3–4 м.

Развитие угледобывающей отрасли показало, что ранее разработанные типовые схемы передвижки секций механизированной крепи являются сдерживающим фактором для увеличения нагрузки на очистной забой. В подавляющем большинстве очистных забоев Донбасса при управлении кровлей полным обрушением применяется последовательная схема передвижки секций механизированной крепи. При таком способе управления кровлей часто возникает ситуация, когда очистной комбайн удаляется

от места передвижки секций на расстояние более 4–5 м из-за отставания процесса креплений. В большинстве случаев это обуславливает разрушение непосредственной кровли пласта и вывалы породы в призабойное пространство. В работе усовершенствована упругопластическая модель взаимодействия

механизированной крепи очистного забоя с углепородным массивом, позволяющая в зависимости от свойств вмещающих пород разрабатывать схемы передвижки секций механизированной крепи для сложных горно-геологических условий отработки угольных пластов на больших глубинах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов И. В., Лобков Н. И., Сергиенко А. И. Выбор метода математического моделирования и установление рациональной длины лав // Физико-технические проблемы горного производства. — 2011. — № 14. — С. 68–75.
2. Антонов М. А., Оганесян Н. К., Агафонов В. В. Адаптация методов оптимизации многофакторных задач и специальных методов оптимизации сложных систем к технологическим схемам угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 11. — С. 367–371.
3. Антипов И. В. Геомеханические и технологические основы создания нового уровня крепей очистных забоев тонких пологих пластов: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.15.02. — Донецк: ДонГТУ, 1995. — 40 с.
4. Рогова Т. Б., Шаклеин С. В. Достоверность запасов угольных месторождений. Количественная оценка и мониторинг. — Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. — 508 с.
5. Шурыгин Д. Н., Голик В. И. Исследование процесса автоматизации прогнозирования горно-геологических условий в геоинформационных системах управления горным предприятием // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № S4–15. — С. 3–11.
6. Шурыгин Д. Н., Литовченко Т. В., Заика А. А., Добровольский В. А. Геометризация показателей на основе принципов натурно-модельного эксперимента и эвристической самоорганизации математических моделей сложных систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 8. — С. 89–94.
7. Ghasemi E., Ataei M. Application of fuzzy logic for predicting roof fall rate in coal mines // Neural computing and applications. — 2013. — Vol. 22, No. 1. — Pp. 311–321.
8. Jelínek J., Stanek F., Věbr L., Honek J. The spatial distribution of the lignite qualitative parameters and variant estimates of coal reserves: the Czech Part of the Vienna Basin // International journal of earth sciences. — 2014. — Vol. 103, No. 4. — Pp. 1113–1123.
9. Li W., Luo Ch., Yang H., Fan O. Memory cutting of adjacent coal seams based on a hidden Markov model // Arabian journal of geosciences. — 2014. — Vol. 71 — Pp. 5051–5060.
10. Navarra A., Montiel L., Dimitrakopoulos R. Stochastic strategic planning of open-pit mines with ore selectivity recourse // International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 1 July 2016, Pp. 1–17.
11. Rahmanpour M., Osanloo M. Determination of value at risk for longterm production planning in open pit mines in the presence of price uncertainty // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. — Vol. 116, Issue 3, March 2016, Pp. 229–236.
12. Shurygin D. N., Gorbatenko N. I., Grechikhin V. V., Shaykhtudinov D. V. Geometrization of physical-mechanical properties of rocks based on the solution of the inverse problem of diagnostics of a condition of geophysical parameters // Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2016. — Vol. 11. — No. 4. — P. 2764–2768. **ПАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Турбор Ирина Александровна¹ — соискатель,
Шурыгин Дмитрий Николаевич¹ — кандидат технических наук,
доцент, e-mail: shurygind@mail.ru,

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова.

Elastoplastic model of interaction between powered roof support and coal–rock mass in longwall face

Turbor I.A.¹, Applicant,

Shurygin D.N.¹, Candidate of Technical Sciences,

Assistant Professor, e-mail: shurygind@mail.ru,

¹ M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 346428, Novocherkassk, Russia.

Abstract. The improved elastoplastic model of interaction between powered roof support and coal–rock mass in longwall face allows designing advance of the powered roof support in difficult ground conditions of deep-level longwalls depending on properties of enclosing rock mass. It is found that with an increase in anisotropy of enclosing rocks, when Young's modulus in horizontal direction is twice as large as in vertical direction, the horizontal tensile stress exceeds the vertical tensile stress 5 times. The main factors to substantiate the scheme of the powered roof support advance are the length of the influence zone of coal cutting and powered roof support advance as well as the geomechanical processes in enclosing rock mass.

Key words: longwall face, elastoplastic model, anisotropy, powered roof support, rock mass.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-94-99

REFERENCES

1. Antipov I.V., Lobkov N.I., Sergienko A.I. Vybora metoda matematicheskogo modelirovaniya i ustanovleniya ratsional'noy dliny lav [Selection of the mathematical modeling method and setting of the rational longwall length]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy gornogo proizvodstva*. 2011, no 14, pp. 68–75. [In Russ].
2. Antonov M.A., Oganetsyan N.K., Agafonov V.V. Adaptatsiya metodov optimizatsii mnogofaktornykh zadach i spetsial'nykh metodov optimizatsii slozhnykh sistem k tekhnologicheskim skhemam ugol'nykh shakht [Adapting optimization methods of multifactorial problems and special optimization methods of complex systems to process flow charts of coal mining]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 11, pp. 367–371. [In Russ].
3. Antipov I.V. *Geomekhanicheskie i tekhnologicheskije osnovy sozdaniya novogo urovnya krepey ochistnykh zaboev tonkikh pologikh plastov* [Geomechanical and engineering framework for next level support of longwalls in thin gently dipping coal seams], Doctor's thesis, Donetsk, DonGTU, 1995, 40 p.
4. Rogova T.B., Shaklein S.V. *Dostovernost' zapasov ugol'nykh mestorozhdeniy. Kolichestvennaya otsenka i monitoring* [Reliability of coal reserves. Quantitative appraisal and monitoring]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011, 508 p.
5. Shurygin D.N., Golik V.I. *Issledovanie protsessava avtomatizatsii prognozirovaniya gorno-geologicheskikh usloviy v geoinformatsionnykh sistemakh upravleniya gornym predpriyatiem* [Analysis of automation of geological conditions prediction in geoinformation systems of mine management]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no S4–15, pp. 3–11. [In Russ].
6. Shurygin D.N., Litovchenko T.V., Zaika A.A., Dobrovolskiy V.A. Geometrizatsiya pokazateley na osnove printsipov naturno-mode'l'nogo eksperimenta i evristicheskoy samoorganizatsii matematicheskikh modeley slozhnykh sistem [Geometrization of indexes based on the principles of in-situ/model experiment and heuristic self-organization of mathematical models of complex systems]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, no 8, pp. 89–94. [In Russ].
7. Ghasemi E., Ataei M. Application of fuzzy logic for predicting roof fall rate in coal mines. *Neural computing and applications*. 2013. Vol. 22, No. 1. Pp. 311–321.
8. Jelinek J., Stanek F., Vebr L., Honek J. The spatial distribution of the lignite qualitative parameters and variant estimates of coal reserves: the Czech Part of the Vienna Basin. *International journal of earth sciences*. 2014. Vol. 103, No. 4. Pp. 1113–1123.
9. Li W., Luo Ch., Yang H., Fan O. Memory cutting of adjacent coal seams based on a hidden Markov model. *Arabian journal of geosciences*. 2014. Vol. 71 Pp. 5051–5060.
10. Navarra A., Montiel L., Dimitrakopoulos R. Stochastic strategic planning of open-pit mines with ore selectivity recourse. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 1 July 2016, Pp. 1–17.
11. Rahmanpour M., Osanloo M. Determination of value at risk for longterm production planning in open pit mines in the presence of price uncertainty. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. Vol. 116, Issue 3, March 2016, Pp. 229–236.
12. Shurygin D.N., Gorbatenko N.I., Grechikhin V.V., Shaykhtudinov D.V. Geometrization of physical-mechanical properties of rocks based on the solution of the inverse problem of diagnostics of a condition of geophysical parameters. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. Vol. 11.No. 4. P. 2764–2768.