

УДК 622.33.013.3

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ СЕКЦИИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ
С УЧЕТОМ НАПРЯЖЕНИЙ В КРОВЛЕ**

М. Э. Еткин, Ф. Симсир

*Университет Девятого Сентября, Инженерный факультет, кафедра Горного Дела,
E-mail: mustafa.yetkin@deu.edu.tr, 353900, г. Бука-Измир, Турция*

Рассмотрено применение длинностолбовой системы разработки с рабочей высотой секций механизированной крепи для пласта, мощность которого достигает 7.3 м. Увеличение рабочей высоты требует повышения их несущей способности. Решена задача безопасного удержания нагрузок кровли и их передача на почву выработки. Выполнен анализ напряжений в кровле при различной рабочей высоте длинного забоя. Для определения наиболее подходящей рабочей высоты крепи рассчитаны средние распределения нагрузок. На основе математического моделирования работы механизированных крепей в шести различных забоях установлены оптимальные ее параметры с учетом свойств горных пород, их напряженного состояния и выработанного пространства.

Механизированная крепь, рабочая высота, численное моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20190104

Длинностолбовая система разработки является эффективным способом добычи угля. Производительность данного способа потенциально выше, так как здесь осуществляется непрерывный процесс, требующий меньшего числа рабочих и позволяющий поддерживать высокую скорость производства. Эта система имеет ряд других преимуществ: рабочие и оборудование сосредоточены в меньшем количестве рабочих секций, что обеспечивает большую простоту управления; исключено анкерное крепление кровли в очистном забое, что снижает необходимость применения инертных материалов для предотвращения детонации угольной пыли. Кроме того, метод не предполагает взрывных работ с их последующими опасностями. При данном методе система транспортировки угля проще, контроль вентиляции проводится эффективнее и посадка кровли более предсказуема. Следовательно, добыча полезных ископаемых длинностолбовой системой разработки наиболее подходит для автоматизации очистных работ [1–9].

При разработке мощных угольных пластов чаще всего применяется рабочая высота секций механизированной крепи более 3.5 м. Наибольшая рабочая высота забоя составляет 7.3 м [10–11]. Технология горных работ с большой высотой секций механизированной крепи позволяет достичь высокой производительности путем повышения скорости подвигания забоя. Тем не менее в определенных геологических условиях часто происходят такие явления, как разрушение целика и обвалы кровли на незакрепленных участках. Ввиду того что горное оборудование, ведущее разработку на большой рабочей высоте, имеет большую грузоподъемность, после разрушения целика или обвала кровли нарушается порядок размещения оборудования. Это влияет

на скорость подвигания забоя и на объем выходной продукции. Таким образом, изучение механизма обрушения и метода управления угольным забоем при технологии разработки с большой рабочей высотой имеет актуальное значение [12 – 15].

Рабочая область забоя была смоделирована с учетом свойств боковых пород. Угол падения пласта — 10° . Диапазон высоты механизированных крепей располагался между 2.5 и 3.5 м. Таким способом смоделированы условия работы шести различных забоев с рабочими высотами 2.5; 2.7; 2.9; 3.1; 3.3; 3.5 м. В процессе работы над моделями определены средние напряжения, возникающие в кровле. Затем проведено сравнение полученных напряжений с рабочим давлением крепей и определена наиболее подходящая рабочая высота.

МЕСТО ИССЛЕДОВАНИЯ

Государственная угольная шахта “Омерлер” расположена на западе Турции рядом с провинцией Кютахья, где примерно залегает 4.6 % бурого угля от общего количества залежей Турции (рис. 1). Этот бассейн ежегодно производит 50 млн т/100 м² бурого угля, что составляет 7.5 % добычи угля в Турции, 80 % запланированной добычи угля осуществляется открытым способом (4.2 млн т/год), остальная часть добывается подземным способом.

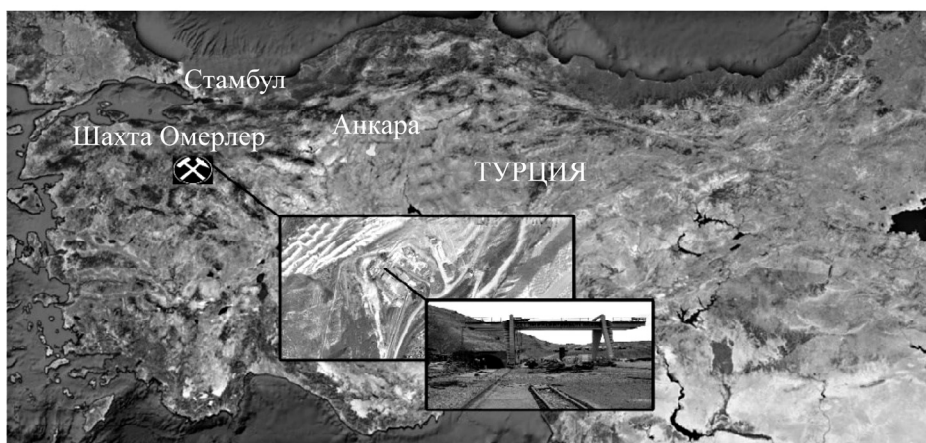


Рис. 1. Географическое расположение исследуемого месторождения (изображение взято из сервиса Google Earth)

Добыча угля производится на шахте с помощью ЛТСС-технологии (технология добычи с выпуском угля из подкровельной пачки). Нижняя пачка пласта мощностью 3 м разрабатывается в забое, верхняя пачка мощностью 5 м подлежит обрушению с выпуском в задней части секции щитовой крепи. (рис. 2).

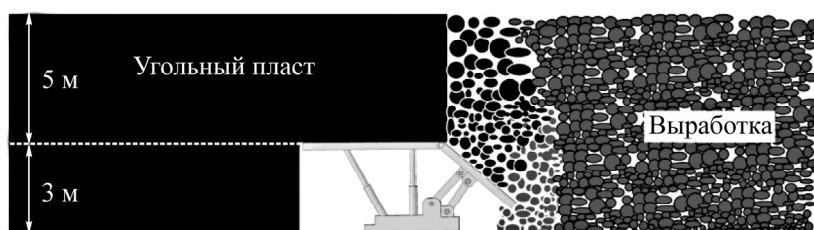


Рис. 2. Применение ЛТСС-технологии на рассматриваемом месторождении

Схема механизированного участка А5 шахты “Омерлер” представлена на рис. 3. Данный участок располагается на глубине 207 м, где мощность непосредственной кровли составляет около 17 м; над ней залегают породы мощностью 182 м.

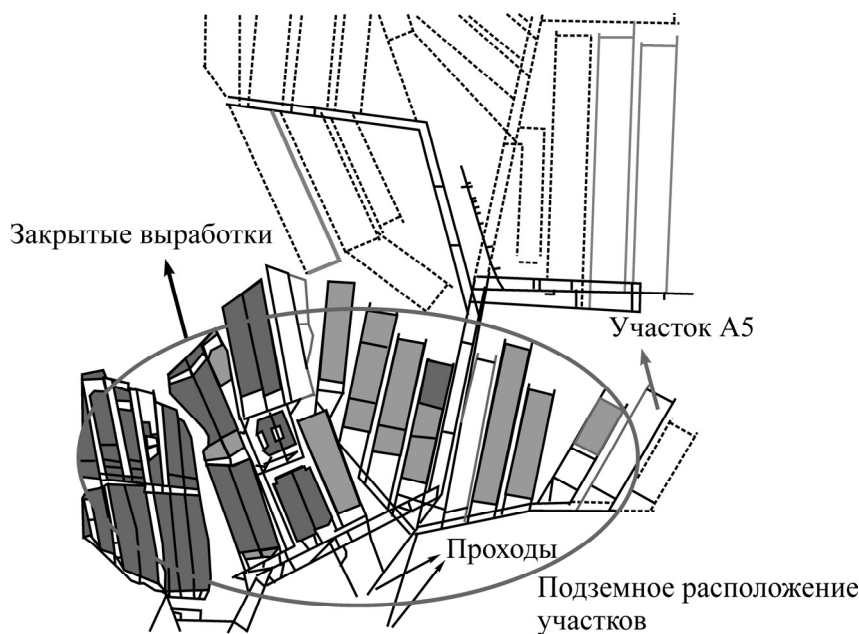


Рис. 3. Схема расположение участков (не в масштабе)

СОСТАВ И СВОЙСТВА ГОРНОЙ ПОРОДЫ

Лабораторные исследования проводились на керновых пробах, взятых из скважины JT-4, которая пробурена с целью исследования геомеханических свойств пород, окружающих угольный пласт на рабочем участке. Результаты исследования приведены в табл. 1 [16–19].

ТАБЛИЦА 1. Физические и механические свойства неповрежденного угля и окружающей породы

Порода	Удельный вес γ , МН/м ³	Одноосное напряжение сжатия σ_c , МПа	Модуль Юнга E_i , МПа	Геологический индекс прочности (GSI)
Известковый мергель	0.023	29.20	5520	52
Мергель	0.022	16.10	2530	52
Глинистый известняк в почве	0.021	12.00	2785	52
Глинистый известняк в подошве	0.024	24.50	3204	52
Мягкий глинистый известняк	0.023	11.52	1669	52
Уголь	0.013	12.15	1748	47

Геомеханические свойства породы определены путем проведения опытов над пробами, взятых из скважины. В процессе моделирования геологические слои были представлены однородной горной породой, а не скальным материалом. Перевод геомеханических свойств в числовые значения горной породы осуществлялся с помощью программного обеспечения “RocData” [20], которое переводит свойства скального материала в свойства горной породы, используя различные критерии оценки разрушения. Зону выработки моделировали с учетом исследования, выполненного в 2013 г. [21]. В зоне разрыва пластов и в зоне релаксации напряжений образуются трещины благодаря подвиганию забоя; это способствует обрушению за забоем. Свойства породы этих зон выбраны с учетом того, что их значения должны быть меньше, чем значения свойств непосредственной кровли и угольного пласта. Участку, где разрушается и обваливается угольный пласт на зад-

нюю часть забоя, дано определение “Уголь за забоем”. Свойства породы данного участка включены в модель, поскольку их значения меньше, чем значения свойств породы зоны релаксации напряжений. Так как материал, залегающий в зоне выработки, и уголь за забоем не соприкасаются с налегающими породами, остаточный угол внутреннего трения и значения когезионной прочности этих зон также включены в модель. Свойства породы данных зон представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Геомеханические свойства угля и окружающей породы, используемые в модели

Участок	γ , МН/м ³	E , МПа	ν	σ , МПа	ϕ , град	$\phi_{ост}$, град	c , МПа	$c_{ост}$, МПа
Уголь	0.013	519.64	0.25	0.04689	27.8798	—	0.238185	—
Зона релаксации напряжений	0.013	70.00	0.28	0.00638	18.5989	—	0.115901	—
Зона разрыва пластов	0.020	226.81	0.30	0.01488	20.3125	—	0.201093	—
Непосредственная кровля	0.020	1105.87	0.28	0.08300	28.3483	—	0.371284	—
Зона выработки	0.014	100.00	0.40	0	28.0000	25	0.110000	0.10
Уголь за забоем	0.014	50.00	0.40	0	28.0000	25	0.110000	0.10
Висячее крыло сброса	0.022	974.27	0.25	0.06166	34.4722	—	0.466447	—
Подошва выработки	0.021	2480.30	0.31	0.20419	32.1064	—	0.620170	—

Примечание. ν — коэффициент Пуассона; σ — прочность на разрыв; ϕ — угол внутреннего трения; $\phi_{ост}$ — угол внутреннего трения (остаточный); c — когезия; $c_{ост}$ — когезия остаточная

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛИННОГО ЗАБОЯ

Рабочее месторождение моделировали с использованием программного обеспечения “Phase^{2D}” [22] с учетом 8 различных участков, в которых имеются данные о месторождении. Названия участков: уголь, зона релаксации напряжений, зона разрыва пластов, непосредственная кровля, зона выработки, уголь за забоем, висячее крыло сброса и подошва выработки. Чтобы представить участки в модели наиболее точным образом, значения свойств породы каждого участка определялись заранее и добавлялись в модель отдельно друг от друга. Модель сплошного забоя приведена на рис. 4.

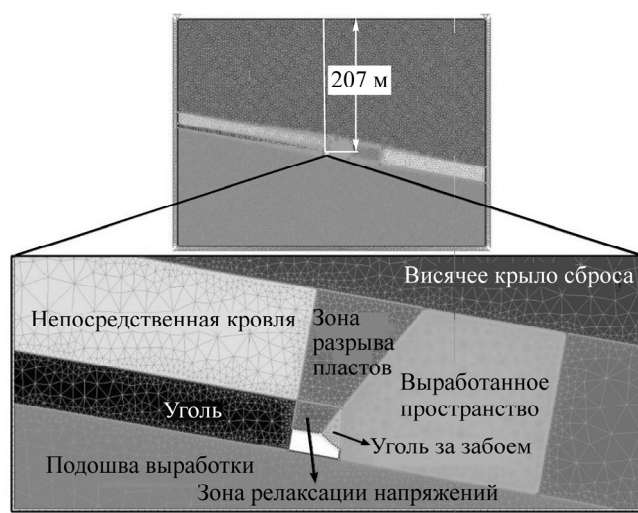


Рис. 4. Модель сплошного забоя с углом подвигания забоя 10°

Механизированные крепи, используемые в длинных забоях, удерживают и передают нагрузки с кровли и с зоны обрушения на почву выработки. По этой причине крепь представлена линейной опорой, чтобы включить ее в модель и составить схему, которая показывает со-

противление нагрузки со стороны кровли. Частями крепи, которые контактируют с кровлей и с зоной выработки, являются перекрытие и щит ограждения соответственно. Данные части крепи, используемые в угольной шахте, изготавливаются из стали Q460 (ближайший аналог 18Г2АФ). Механические свойства данной стали (модуль Юнга 209670 МПа; коэффициент Пуассона 0.3; удельный вес 0.0785 МН/м³) включены в модель, чтобы линейная опора имела свойства реальной механизированной крепи. Линейная опора в модели показана на рис. 5.

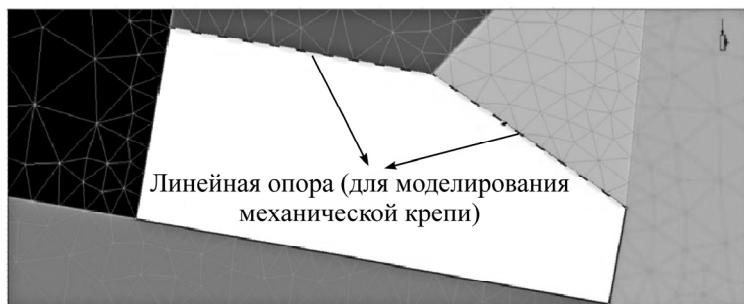


Рис. 5. Линейная опора для включения в модель механизированной крепи

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

После выполнения определенных шагов модели сплошного забоя были запущены в работу. Таким образом были определены напряжения, воздействующие на перекрытие и щит ограждения крепи. Чтобы выполнить точное вычисление, установлены 194 измерительные точки на линию перекрытия (4.5 м) и на линию щита ограждения (4 м) с интервалом между соседними точками 4 см (рис. 6). Средние значения напряжений приведены в табл. 3.

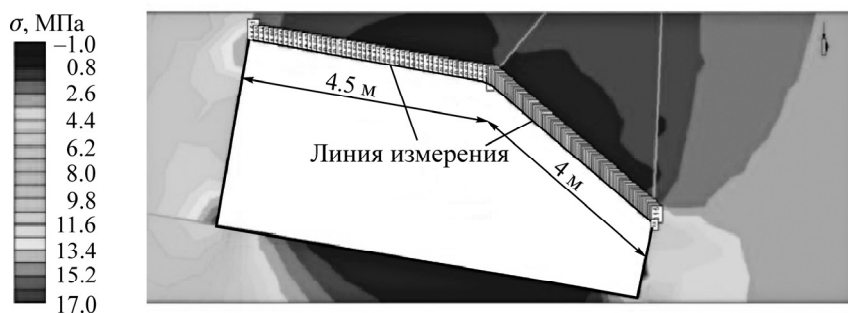


Рис. 6. Линии измерения на модели

ТАБЛИЦА 3. Напряжения в кровле при различных рабочих высотах забоя

Высота забоя, м	Среднее напряжение, МПа	
	Кровля	Выработанное пространство
2.5	0.8613	0.0247
2.7	0.9167	0.0224
2.9	0.9676	0.0040
3.1	1.0030	0.0055
3.3	1.0087	0.0080
3.5	0.8130	0.3709

Изменение средних значений напряжений, возникающих в кровле и в зоне выработанного пространства при различных рабочих высотах, представлены на рис. 7.

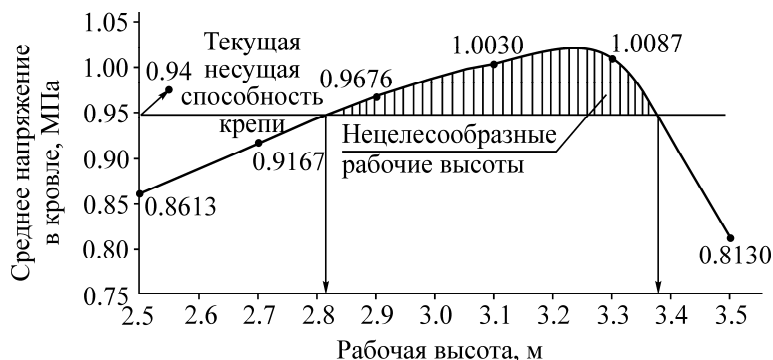


Рис. 7. Изменение средних значений напряжений, возникающих в кровле и в зоне выработанного пространства

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Во время добычи угля длинным забоем рабочая высота изменяется благодаря падению пласта, притоку воды, различным дефектам и нагрузкам в кровле. Таким образом, всегда присутствует разница между теоретической и фактической рабочей высотой. Следовательно, необходимо выбирать механизированные крепи с достаточно большим рабочим диапазоном.

Рабочее давление механизированной крепи, используемой в рассматриваемой шахте, составляет 0.81 МПа, а несущая способность крепи — 0.94 МПа. Согласно данным табл. 3, средние напряжения, возникающие в кровле при различных высотах, не препятствуют качественной добыче сплошным забоем. Показано, что средние напряжения в кровле, возникающие при рабочих высотах 2.8–3.4 м, превышают рабочее давление крепи. В результате повышения напряжений вследствие изменения нагрузки кровли предполагается, что крепь будет отсоединяться от кровли с высокой периодичностью. Это не мешает работе при данных высотах, но из-за задержки времени на регулировку крепи снижается средняя производительность работы. С экономической точки зрения работа при таких высотах крепи нецелесообразна.

Установлено, что наименьшее среднее напряжение в кровле (0.813 МПа) возникает при рабочей высоте 3.5 м. Данная высота является оптимальной для рассматриваемой крепи и обеспечивает эффективную разработку угольного пласта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peng S. S., Chiang H. S. Longwall mining, NY, Wiley, 1984.
2. Simsir F. and Ozfirat M. K. Determination of the most effective longwall equipment combination in longwall top coal caving (LTCC) method by simulation modelling, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2008, Vol. 45, No. 6. — P. 1015–1023.
3. Vakili A. and Hebblewhite B. K. A new cavability assessment criterion for Longwall Top Coal Caving, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2010, Vol. 47, No. 8. — P. 1317–1329.
4. Ghosh A. K. and Gong Y. Improving coal recovery from longwall top coal caving, J. Mines, Met. Fuels, 2014, Vol. 62, No. 3. — P. 51–64.
5. Wang J. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines, Int. J. Coal Sci. Technol., 2014, Vol. 1, No. 3. — P. 253–260.
6. Basarir H., Oge I. F., and Aydin O. Prediction of the stresses around main and tail gates during top coal caving by 3D numerical analysis, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2015, Vol. 76. — P. 88–97.
7. Kumar R., Singh A. K., Mishra A. K., and Singh R., Underground mining of thick coal seams, Int. J. Min. Sci. Technol., 2015, Vol. 25, No. 6. — P. 885–896.
8. Simsir F. Underground mining methods, Izmir, DEU Publications, 2015.

9. **Boutrid A., Cherif Djouamaa M., Chettibi M., Bouhedja A., and Talhi K.** Design of a model powered support system in Kenadsa mine (Algeria), *J. Min. Sci.*, 2016, Vol. 52, No. 1. — P. 78–86.
10. **Wang J. C.** Fully mechanized longwall top coal caving technology in China and discussion on issues of further development, *Coal Sci. Technol.*, 2005, Vol. 35, No. 1. — P. 14–17.
11. **Wang J. C.** Theory and technology in mining thick coal seams, Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009. — P. 23–36.
12. **Zhao H. Z.** The control and mechanism of rib spalling in large mining face, *The Mine Pressure*, 1989, No. 2. — P. 27–29.
13. **Yuan Y., Tu S. H., and Wu Q.** Mechanics of rib spalling of high coal walls under fully-mechanized mining, *Min. Sci. Technol.*, 2011, Vol. 21, No. 1. — P. 129–133.
14. **Yuan Y., Tu S. H., and Ma X. T.** Coal wall stability of fully mechanized working face with great mining height in “three soft” coal seam and its control technology, *J. Min. Saf. Eng.*, 2012, Vol. 29, No. 1. — P. 22–25.
15. **Wang J. C., Yang Y. C., and Kong D. Z.** Failure mechanism and grouting reinforcement technique of large mining height coal wall in thick coal seam with dirt band during topple mining, *J. Min. Saf. Eng.*, 2014, Vol. 31, No. 6. — P. 832–837.
16. **Yetkin M. E., Şimşir F., Özfırat M. K., Özfırat P. M., and Yenice H.** A fuzzy approach to selecting roof supports in longwall mining, *S. Afr. J. Ind. Eng.*, 2016, Vol. 27, No. 1. — P. 162–177.
17. **Destanoglu N., Taskin F. B., Tastepe M., and Ogretmen S.** Omerler mechanized longwall application, Turkish Coal Administration, 2000, Ankara (in Turkish).
18. **Yasitli N. E. and Unver B.** 3D numerical modeling of longwall mining with top-coal caving, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2005, Vol. 42, No. 2. — P. 219–235.
19. **Ozfırat M. K.** Investigations on determining and decreasing the coal loss at fully-mechanized production in Omerler underground coal mine, PhD Thesis, Institute of Natural and Applied Sciences, Dokuz Eylul University, 2007, Izmir (in Turkish).
20. **RocData**, 5.0. Rock, soil and discontinuity strength analysis, Version 5.0, 2014.
21. **Verma A. K. and Deb D.** Numerical analysis of an interaction between hydraulic-powered support and surrounding rock strata, 2013, *Int. J. Geomech.*, Vol. 13, No. 2. — P. 181–192.
22. **Phase2**, Version 8.020-2014, Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada.

Поступила в редакцию 31/I 2017

После доработки 16/X 2018

Принята к публикации 29/I 2019