

УДК 622.831

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ НАЛЕГАЮЩИХ ПОРОД
ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕГЛУБОКИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ КОРОТКИМИ ЗАБОЯМИ**

Люджун Динг¹, Юхонг Лиу²

¹Сычуаньский университет, E-mail: mddh966@126.com, 610065, г. Ченгду, Китай

²Сычуаньский колледж архитектурных технологий, 618000, г. Де Янг, Китай

На примере горнодобывающего района Шаньдун с помощью физического 3D-моделирования выявлены закономерности смещения пород кровли угольных пластов, залегающих на небольшой глубине. Результаты показали, что смещение земной поверхности и напряжения в породах кровли незначительны, что обуславливает отсутствие опасных деформаций в налегающем массиве. Установлено, что увеличение расстояния подвигания забоя приводит к росту смещений дневной поверхности и кровли пласта. В условиях интенсивного проявления горного давления при деформировании кровли сложно обеспечивать устойчивость массива.

Неглубокое залегание, дневная поверхность, пласт, порода, кровля, физическое 3D-моделирование, смещения, напряжения

DOI: 10.15372/FTPRPI20190510

Горнопромышленный район Шаньдун — один из крупнейших каменноугольных бассейнов в мире. Горные работы по отработке пологопадающих угольных пластов с низкой газоносностью ведутся на глубинах 100–150 м [1–4]. Практика показывает, что характер проявления горного давления применительно к неглубокому залеганию пластов отличается от классической разработки длинными забоями. При наличии труднообрушаемых кровель нелегко обеспечить безопасность работ. Процесс добычи полезного ископаемого обуславливает формирование вокруг очистных выработок сложного напряженно-деформированного состояния массива пород. Последнее является причиной возможных отслоений пород кровли, в том числе в виде горных ударов, приводящих к повреждению добычного комплекса и в целом к остановке добычи в шахте [5–9]. Изучение закономерностей поведения налегающих пород в угольных пластах неглубокого залегания имеет теоретическую и практическую значимость.

Основная цель аналогового моделирования — разработка мероприятий по управлению кровлей и определение безопасных параметров выемки. Физические (лабораторные) эксперименты позволяют учитывать неоднородность, слоистость геологической среды, устанавливать смещения пород, приводящие к их обрушению, и другие процессы, связанные с изучением механического состояния горного массива. Плоская модель не отражает всей сущности изучаемых явлений [10, 11]. Для исследования объектов, находящихся в сложном напряженно-деформированном состоянии, прибегают к трехмерному моделированию.

Институт геомеханики Китайской академии наук разработал физическую модель для моделирования геологических структур и внес значительный вклад в исследование устойчивости откосов и механизма разрушения пород сдвигом. Некоторые научно-исследовательские учреждения, представленные Пекинским угольным научно-исследовательским центром, провели экспериментальные исследования горного давления. Многие результаты достигнуты на основе трехмерного моделирования, изучения экспериментальных данных и мониторинга [12–15]. В [16] с помощью численного моделирования методом конечных элементов изучены вопросы деформирования и разрушения налегающих пород при отработке угольных пластов. Показано, что со снижением мощности вышележащего слоя аллювия наблюдается уменьшение первичного шага обрушения кровли и рост в ней смещений. Перемещения и скорости движения поверхности массива путем моделирования 3D-решетки масс, связанных упругими пружинами и вязкими демпферами, рассчитаны в [17]. Проведено сравнение с аналогичными данными по упругой модели и натурными экспериментами других исследований. В [18] с помощью аналогового моделирования изучены характеристики разрушения налегающей породы при отработке неглубоко залегающих пластов и выявлены особенности их выемки длинным забоем. Для условий некоторых угольных шахт Китая описан механизм смещения нагрузки в пределах неконсолидированного напорного водоносного горизонта и его влияние на сложный процесс разрушения налегающей породы, а также случаи выхода из строя механизированных крепей, произошедших во время добычи угля в сложных гидрогеологических условиях под маломощными скальными породными слоями [19]. В [20–22] смоделирован участок горных работ и очистной забой подобной шахты для выявления вероятности прорыва воды вследствие ведения добычи. Использован натуральный материал из водоносного эолового песка и маломощных вмещающих пород для изучения двух аспектов определения параметров горных работ для схожих условий песчано-водяной пульпы. Эксперименты на модели с выбранными параметрами подобия показали свою эффективность.

В настоящее время исследования угольного пласта в районе отработки месторождения Шендонг осуществляются путем разработки трехмерных имитационных физических моделей, позволяющих изучить поведение массива горных пород в процессе выемки угля на небольшой глубине.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ. РАЗРАБОТКА И ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Трехмерное моделирование закономерностей смещения налегающего массива при отработке пласта с маломощным слоем подстилающих коренных пород на небольшой глубине проводилось на примере угольного пласта 1^{-2#} в горнопромышленном районе Шаньдун, расположенном в северо-восточной части каменноугольного бассейна на севере провинции Шаньси. Массив горных пород вблизи земной поверхности представлен современным эоловым песчаником и лессовыми четвертичными породами. Геологическое строение горного района относится к моноклинной структуре. Угольный пласт характеризуется неглубоким залеганием, маломощным подстилающим слоем вмещающих пород и мощным вышележащим слоем лессовых пород. Расстояние от дневной поверхности до кровли пласта составляет 100 м. По литологии выделяются следующие мощности слоев горных пород: налегающие рыхлые — 80 м, скальные кровли пласта — 20 м, среднезернистый песчаник непосредственной кровли — 6 м, мелкозернистый и крупнозернистый песчаник основной кровли 8 и 6 м соответственно, угольный пласт — 5 м. В табл. 1 представлены физико-механические свойства угля и налегающих пород.

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические свойства массива горных пород

Порода	Мощность, м	Объемная плотность, кН/м ³	Прочность на сжатие, МПа	Когезия, МПа	Угол внутреннего трения, град	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, ГПа
Эоловый песок	20	15.8	0.012	—	11	0.31	0.012
Песчанистый гравий	60	18.0	0.016	—	20	0.30	0.015
Гравелит	6	24.3	36.6	5.92	32	0.28	35
Мелкозернистый песчаник	8	25.0	44.6	7.59	33	0.28	32
Среднезернистый песчаник	6	23.9	45.3	6.85	30	0.25	33
Уголь в пласте 1 ^{-2#}	5	14.8	10.5	1.20	20	0.35	15
Мелкозернистый песчаник	8	25.0	44.6	7.20	37	0.28	32

Согласно теории механического подобия, реальных условий залегания пласта и экспериментальной модели, геометрический масштаб моделирования принят 1:100, кинематическое подобия — 1:10, отношение объемной плотности 0.6. Модель имеет высоту 113 см. Мощность налегающей породы — 80 см, пород основной кровли — 20 см, угольного пласта — 5 см и пород почвы пласта — 8 см. Исходя из низкой прочности налегающей рыхлой породы, для ее моделирования с соблюдением динамического подобия использовался речной песок, древесные опилки, угольная зола, цемент, гипс, карбонат кальция. Такие слоистые материалы, как слюдяной порошок и цемент изготавливались искусственно. Требуемое соотношение и механические свойства используемых материалов выбирались на основе расчета и большого количества экспериментов. В табл. 2 представлены физико-механические свойства модели угольного пласта.

В соответствии с техническими условиями разработки угольного пласта и расположением добычных забоев, габаритные размеры трехмерной аналоговой физической модели составили 300 × 200 × 200 мм, размеры непосредственно самой модели — 135 × 200 × 113 мм. Ее внешний вид показан на рис. 1. Длина рабочей поверхности 120 см. С учетом симметрии фактическое ее расположение составляет 60 см. При этом учтено 40 см предохранительного целика и резерв пласта 35 см. Чтобы убедиться в физических свойствах материала модели, построение ее должно обеспечивать выемку 5 см угольного пласта каждые 72 мин. Ежедневно забой подвигался на 10 см. Общее время отработки пласта уменьшено в 32 раза.

ТАБЛИЦА 2. Основные физико-механические свойства модели массива пород

Порода	Структура и толщина породы в натуре			Структура и толщина породы в модели		
	Мощность, м	Прочность на сжатие, МПа	Объемная плотность, кН/м ³	Мощность, см	Прочность на сжатие, МПа	Объемная плотность, кН/м ³
Эоловый песок	20	0.012	15.8	20	0.072	9.48
Песчанистый гравий	60	0.016	18.0	60	0.096	10.80
Гравелит	6	36.6	24.3	6	219.600	14.58
Мелкозернистый песчаник	8	44.6	25.0	8	267.600	15.00
Среднезернистый песчаник	6	45.3	23.9	6	271.800	14.34
Уголь в пласте 1 ^{-2#}	5	10.5	14.8	5	63.000	8.88
Мелкозернистый песчаник	8	44.6	25.0	8	267.600	15.00



Рис. 1. Внешний вид трехмерной модели

Мониторинг процессов, протекающих в модели, заключался в измерении смещений дневной поверхности и налегающих пород (кровли). Основные инструменты мониторинга — датчик давления, оборудование по хранению полученных экспериментальных данных, камера и микрометр (рис. 2). Точки мониторинга смещений располагались на поверхности и налегающей породе, а напряжений — на кровле. Датчик давления находился в средней плоскости кровли.

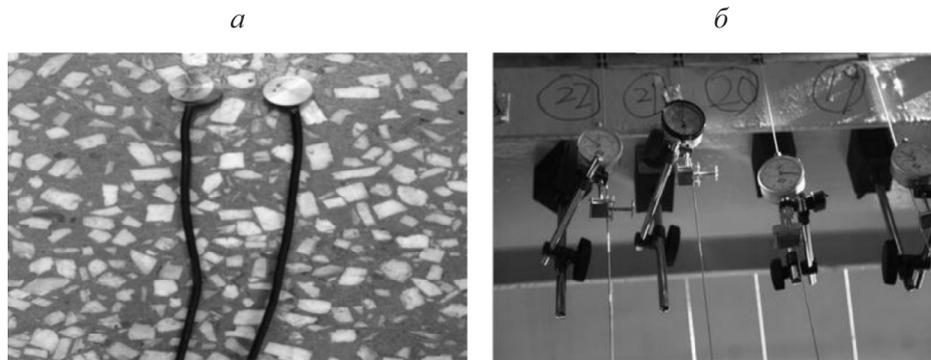


Рис. 2. Оборудование для мониторинга: *а* — датчик давления; *б* — индикатор часового типа

Закономерность смещения вышележащего массива определялась по точкам мониторинга в пустотах, расположенных в поверхностном слое и налегающих породах. По точкам мониторинга напряжений отслеживалось изменение давления в кровле. Датчик давления располагался в плоскости кровли. Результаты измерений смещений дневной поверхности и кровли отображались на индикаторе. На рис. 3 показано расположение точек мониторинга напряжений и смещений. Для каждой точки смещения кровли предусмотрено ограничивающее устройство. Точки смещения связаны между собой проводной линией. Последняя выходила через верхнюю часть модели и фиксировалась в небольшом квадратном ящике. Индикатор часового типа, закрепленный на контактной магистрали, позволял отслеживать изменения смещений в кровле. Для мониторинга напряжений в кровле угольного пласта и целика использовался датчик давления и оборудование по хранению данных, связанные с компьютером, где в режиме реального времени записывались измерения. Для осмотра формы непосредственной кровли и провалов в выработанном пространстве применялась камера стержневого типа. Датчик давления работал с интервалом 10 с. Мониторинг смещения кровли и почвы пласта происходил каждый час. При повышении напряжений интервал между измерениями составлял 1 раз в 0.5 ч.



Рис. 3. Расположение точек мониторинга давления и смещений

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Случай непосредственного обрушения кровли при разработке очистного забоя на расстоянии 60 м показан на рис. 4а. Значительных смещений в основной кровле не наблюдалось. Непосредственная кровля начала деформироваться в процессе движения очистного забоя. На стадии завершения очистных работ по выемке 60 м пласта основная кровля сохраняла свою устойчивость. Непосредственная кровля при этом полностью разрушилась. После отработки 60 м очистного забоя основная кровля по истечению 11 ч начала смещаться и обрушилась в выработанное пространство. Со временем значительная площадь участка остановки добычных работ подверглась разрушению пород кровли пласта (рис. 4б). Ввиду наличия короткого очистного забоя и угольных целиков, обрушение кровли и смещение дневной поверхности были незначительными, трещинообразование в массиве пород практически отсутствовало.

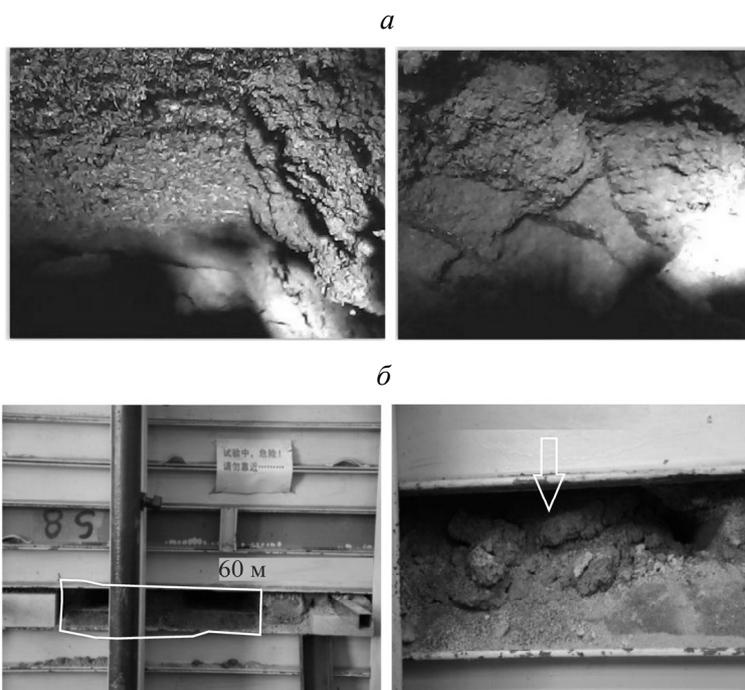


Рис. 4. Обрушение кровли в процессе добычи (а) и характер разрушения кровли на линии остановки забоя 60 м (б)

В ходе экспериментов в режиме реального времени проводились измерения как смещений налегающего массива пород, так и напряжений вокруг очистного забоя. С увеличением площади обнажения пород произошла просадка (смещение) основной кровли в очистное пространство. Заполнение его обрушенной породой обеспечивалось за счет разрушения непосредственной кровли очистного забоя. В данном случае свободное пространство для деформирования основной кровли было меньше, чем в вариантах выемки длинными забоями. После отработки 60 м пласта на участке остановки очистных работ произошло крупномасштабное обрушение основной кровли. В дальнейшем налегающий массив рыхлых пород аналогично смещался в выработанное пространство вдоль формируемых трещин в кровле, в результате чего он заполнялся песчаником. Однако трещины и провалы на дневной поверхности не образовались (рис. 5а).

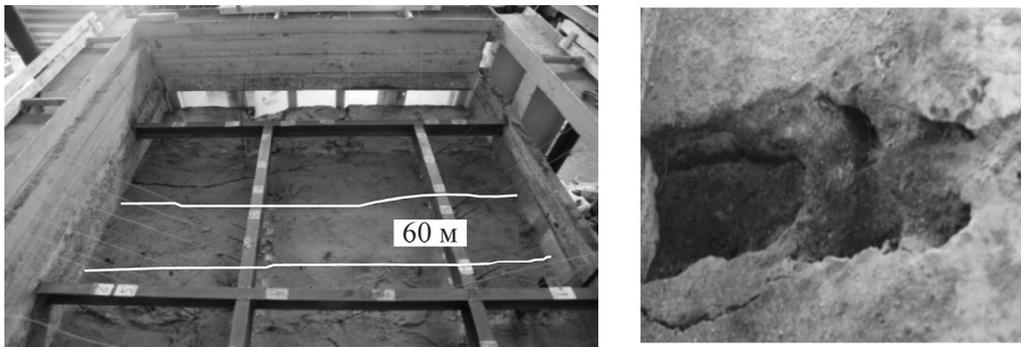


Рис. 5. Изменение поверхности (а) и характер разрушения кровли (б) на расстоянии забоя 60 м

Основными причинами отсутствия разрушающих нагрузок при добыче короткими забоями являются незначительная длина выемки и весьма прочная кровля. Последнее позволило сформировать устойчивое состояние массива пород.

Для анализа закономерностей обрушения вышележащего массива в коротком забое слой рыхлых налегающих пород над ним в 60 м полностью удалялся. Проводился осмотр верхней части поверхности основной кровли (прочных) пород. На рис. 5б показано разрушение поверхности пород основной кровли. Видно, что породы кровли в 30-метровом забое имеют значительные разрушения на участке остановки очистных работ. Кроме того, формируется конструкция массива пород консольного типа, что приводит к обрушению кровли.

В ходе наблюдения за экспериментами установлено, что после отработки угольного пласта неглубокого залегания короткими забоями породы кровли находятся в устойчивом состоянии. При увеличении времени обнажения пород и длины забоя происходит постепенное обрушение кровли. Несмотря на наличие обрушений пород кровли при отработке угольного пласта коротким забоем, вышележащий рыхлый массив находится в устойчивом состоянии. Последнее исключает выход опасных деформаций на дневную поверхность. Следовательно, чем меньше длина очистного забоя, тем выше устойчивость слоев налегающих рыхлых пород. При этом осадка (смещения) налегающих пород может происходить в течение нескольких лет после выемки угольного пласта.

Мониторинг за смещениями налегающей породы проводился в режиме реального времени. Выявлено, что основным видом деформирования налегающих пород являются вертикальные смещения. На рис. 6а представлена диаграмма изменения смещения кровли на каждой точке мониторинга вдоль направления подвигания очистного забоя. Показано, что при достижении

очистным забоем точки мониторинга происходит развитие смещения пород кровли, а при дальнейшем удалении (подвигании) выработки — существенный их рост. Смещение вышележащих слоев пород увеличивалось при приближении к отработанному забою, что в свою очередь приводило к деформированию основной кровли в каждой точке мониторинга. Из полученных результатов видно, что просадка пород кровли начинается вслед за продвижением очистного забоя.

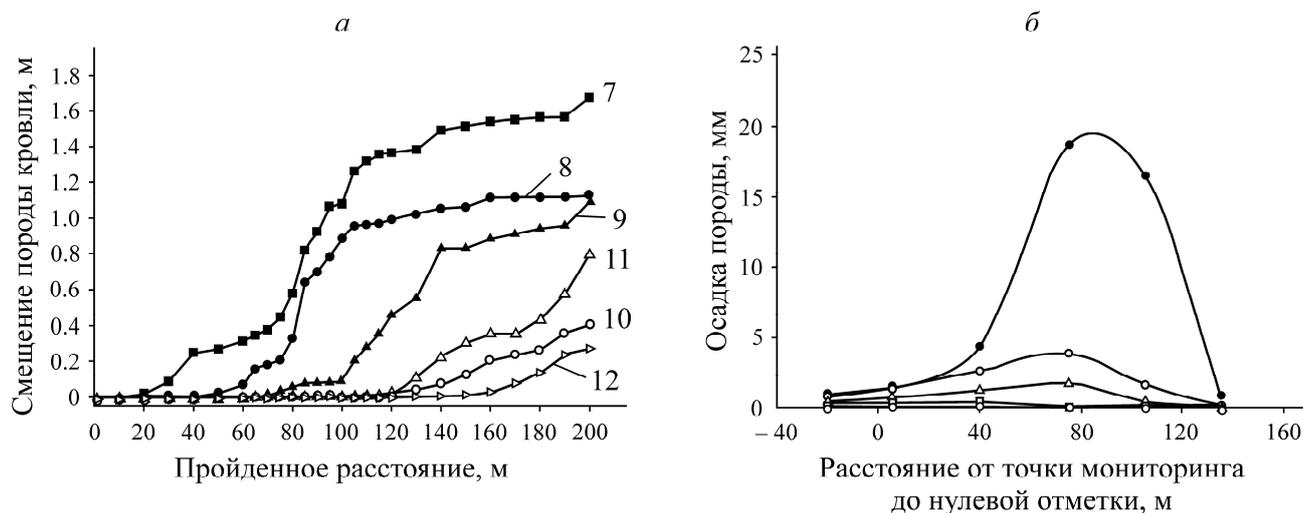


Рис. 6. Изменение смещений кровли вдоль забоя (а) и смещения поверхности на разных точках мониторинга (б)

На рис. 6б показано изменение смещений дневной поверхности на разных точках мониторинга. Так же, как и в предыдущем случае, при достижении очистным забоем точки мониторинга происходило развитие смещений пород, а при дальнейшем продвижении выработки наблюдалось их увеличение. При этом смещение поверхности имело форму, близкую к эллиптической. Максимальное смещение поверхности отмечалось на участке, расположенном над центральной частью области отработки (очистного забоя), с постепенным его уменьшением к флангам. Смещение поверхности повышалось с увеличением расстояния подвигания забоя. При достижении очистным забоем 150 м максимальная осадка поверхности составляла 6 см. Наличие коротких заходок и угольных целиков при отработке пластов свидетельствуют о незначительной просадке дневной поверхности. С увеличением расстояния подвигания выработки эллиптическая форма смещения поверхности постепенно распространялась к очистному забою.

ВЫВОДЫ

Экспериментальные исследования на физических 3D-моделях по ведению горных работ на небольшой глубине выявили важные закономерности деформирования непосредственной и основной кровли угольного пласта, а также вышележащих рыхлых слоев пород и дневной поверхности. Существенное влияние на смещение пород кровли и поверхности оказывает длина очистного забоя, время обнажения массива и наличие оставляемых предохранительных угольных целиков. При использовании короткого очистного забоя обеспечивается более устойчивое состояние кровли. Постепенное увеличение длины забоя, а также времени обнажения массива приводит к росту смещений в кровле и налегающих слоях пород. Максимальные значения деформаций наблюдаются в центральной части погашенного угольного пласта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Huang Q. X.** The characteristics of the shallow buried coal seam and the definition of the shallow buried coal seam, *J. Rock Mech. and Eng.*, 2002, Vol. 21, No. 8. — P. 1174–1177.
2. **Guang X. and Ma Y. D.** Shallow work face mine pressure simulation on the law, *J. Chinese Mining*, 2004, Vol. 13, No. 6. — P. 69–71.
3. **Feng G. R., Wang X. X., and Kang L. X.** A probe into mining technique in the condition of floor failure for coal seam above longwall goafs, *J. Coal Sci. and Eng.*, 2008, Vol. 14, No. 1. — P. 19–23.
4. **Fan G. W., Zhang D. S., and Ma L. Q.** Overburden movement and fracture distribution induced by longwall mining of the shallow coal seam in the Shendong coal field, *J. China University of Min. and Technol.*, 2011, Vol. 2. — P. 196–201.
5. **Xuan Y. Q.** Research on movement and evolution law of breaking of overlying strata in shallow coal seam with a thin bedrock, *J. Rock and Soil Mech.*, 2008, Vol. 2. — P. 512–516.
6. **Gao Y. R., Liu C. W., Kang Y. M., and Huang C. L.** Shallow buried thin bedrock coal seam rapid advancing working face mine pressure appearance law research, *J. Metal Mine*, 2015, Vol. 6. — P. 29–33.
7. **Soni A. K. and Singh A. K. K.** Shallow cover over coal mining: a case study of subsidence at Kamptee Colliery, India, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2007, Vol. 66, No. 3. — P. 311–318.
8. **Liu H., He C. G., and Deng K. Z.** Analysis of forming mechanism of collapsing ground fissure caused by mining, *J. Min. and Safety Eng.*, 2013, Vol. 3. — P. 380–384.
9. **Shi X. C., Meng Z. P., and Yang S.** Simulation of overburden deformation-failure during multi-coal mining in daliuta coal mine, *J. Metal Mine*, 2015, Vol. 3. — P. 53–57.
10. **Liu C. G.** Similar simulation study on the movement behavior of overlying strata in shallow seam mining in Majiliang coal mine, *J. China Coal Society*, 2011, Vol. 36, No. 1. — P. 7–11.
11. **Liu H., He C. G., and Deng K. Z.** Analysis of forming mechanism of collapsing ground fissure caused by mining, *J. Min. and Safety Eng.*, 2013, Vol. 30, No. 3. — P. 380–384.
12. **Ren Y. F. and Qi Q. X.** Study on characteristic of stress field in surrounding rocks of shallow coalface under long wall mining, *J. China Coal Society*, 2011, Vol. 36, No. 10. — P. 1612–1618.
13. **Xu J. L. and Qian M. G.** A method to determine the location of the key strata in the overlying strata, *J. China University of Min. and Tech.*, 2016, Vol. 29, No. 5. — P. 463–467.
14. **Wu Q., Wang L., and Wei X. Y.** Yushenfu mining area in Daliuta coal mining ground subsidence numerical simulation visualization group, *J. Hydro Geological Eng. Geology*, 2016, Vol. 30, No. 6. — P. 37–39.
15. **Adhikary D. P. and Guo H.** Modelling of longwall mining-induced strata permeability change, *J. Rock Mech. and Rock Eng.*, 2015, Vol. 48, No. 1. — P. 345–359.
16. **Zhang G. B., Zhang W. Q., Wang C. H., Zhu G. L., and Li B.** Mining thick coal Seams under thin bedrock-deformation and failure of overlying strata and alluvium, *J. Geotech. and Geol. Eng.*, 2016, Vol. 34, No. 5. — P. 1553–1563.
17. **Aleksandrova N. I.** Pendulum waves on the surface of block rock mass under dynamic impact, *J. Min. Sci.*, 2017, Vol. 53, No. 1. — P. 59–64.
18. **Ren Y. F., Ning Y., and Qi Q. X.** Physical analogous simulation on the characteristics of overburden breakage at shallow longwall coalface, *J. China Coal Society*, 2013, Vol. 38, No. 1. — P. 61–66.
19. **Xu J. L., Chen J. X., and Jiang K.** Effect of load transfer of unconsolidated confined aquifer on compound breakage of key strata, *Chinese J. Rock Mech. and Eng.*, 2017, Vol. 26, No. 4. — P. 699–704.
20. **Huang P. L. and Chen C. X.** Analysis of surface subsidence mechanism in underground mining of thick overburden, *J. Rock and Soil Mech.*, 2010, Vol. 31. — P. 357–362.
21. **Wang J. B., Liu X. R., and Liu X. J.** Dynamic prediction model for mining subsidence, *J. China Coal Society*, 2015, Vol. 40, No. 3. — P. 516–521.
22. **Teng Y. H. and Wang J. Z.** The law and mechanism of ground subsidence induced by coal mining using fully-mechanized caving method, *J. China Coal Society*, 2018, Vol. 33, No. 3. — P. 264–267.

Поступила в редакцию 12/VI 2018

После доработки 17/VI 2019

Принята к публикации 23/IX 2019