

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

DOI: 10.17073/2500-0632-2019-1-23-30

Исследование геомеханического состояния неустойчивых пород в окрестности сопряжений горных выработок

Басов В. В.

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), Новокузнецк, Россия,
✉vadimbasov@yahoo.com

Аннотация: Обоснована актуальность исследований характера деформирования материала на физических моделях, эквивалентных горным породам. Для выявления зависимостей и закономерностей деформирования неустойчивых горных пород в окрестности сопряжений горных выработок разработана и представлена методика экспериментального исследования. В работе был принят метод физического моделирования на эквивалентных материалах. Рассчитаны прочностные характеристики эквивалентного материала для исследуемых пород по формулам, предложенным Г.Н. Кузнецовым. Эквивалентный материал выбран из двух составляющих – песка и парафина. Подобрана рецептура состава смеси и определены пределы прочности эквивалентного материала при сжатии. Эксперимент проводился для трех вариантов физических моделей: нетронутого массива горных пород, массива с одиночной горной выработкой и массива с сопряжением горных выработок. Испытания моделей из эквивалентного материала проводились путем одноосного вертикального нагружения при помощи гидравлического пресса. По результатам испытания моделей из эквивалентного материала представлена динамика развития трещин и разрушения вмещающего эквивалентного материала в окрестности искусственной полости, имитирующей горную выработку. Также получены графики зависимости относительных деформаций от вертикальной нагрузки для каждого поэтапного нагружения трёх моделей. Проведена оценка результатов физического моделирования параметров НДС эквивалентного материала вокруг полостей, имитирующих сопряжения горных выработок. Полученные результаты деформирования материалов, эквивалентных горным породам, предполагается использовать в качестве исходных данных при тестировании результатов физического и численного моделирования, а также при разработке технической документации в части выбора параметров крепления сопряжений горных выработок.

Ключевые слова: физическое моделирование, стенд, горные породы, относительные деформации, вертикальная нагрузка, эквивалентный материал, критерий подобия, модель, метод фотофиксации.

Для цитирования: Басов В. В. Исследование геомеханического состояния неустойчивых пород в окрестности сопряжений горных выработок. *Горные науки и технологии*. 2019;4(1):23-30. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-1-23-30.

The Study of Geomechanical Condition of Unstable Rocks in the Vicinity of Mine Working Junctions

V. V. Basov

Siberian State Industrial University (SibSIU), Novokuznetsk, Russia, ✉vadimbasov@yahoo.com

Abstract: The relevance of research of material strain nature based on physical models equivalent to rocks is substantiated. To identify the dependencies and mechanism of unstable rock strain in the vicinity of mine working junctions, an experimental technique has been developed and presented. The method of physical modeling using equivalent materials was applied in the research. Strength characteristics of the rock equivalent material were calculated using the formulas proposed by G.N. Kuznetsov. The equivalent material was prepared based on two components, sand and paraffin. The mix formulation was selected, and ultimate compressive strength of the equivalent material was determined. The experiment was performed for three options of the physical models: an intact rock mass, a rock mass with a single mine working, and a rock mass with mine working junctions. Testing of the models made of the equivalent material was performed through uniaxial vertical loading using a hydraulic press. Based on the model testing findings, the dynamics of fracture propagation and crushing of the enclosing equivalent material in the vicinity of an artificial cavity, simulating a mine working, has been demonstrated. Besides, the graphs of

relative strain versus vertical loading for each stage of the stepwise loading of these three model options were produced. The findings of the strain-stress distribution modeling for the equivalent material around the cavities simulating mine working junctions were analyzed. The strain testing findings for the materials simulating rock behavior are expected to be used as the initial data for analysis of physical and numerical simulation, as well as for developing engineering documentation with regard to the selection of parameters for supporting mine working junctions.

Keywords: physical modeling, testing device, rocks, relative strains, vertical load, equivalent material, similarity criterion, model, method of photographic evidence.

For citation: Basov V. V. The study of geomechanical condition of unstable rocks in the vicinity of mine working junctions. *Mining Science and Technology*. 2019;4(1):23-30. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2019-1-23-30.

Введение

В настоящее время на угольных шахтах при скорости подвигания очистных забоев до 300 м в месяц сдерживающим фактором являются темпы строительства подготовительных выработок и их сопряжений. Основными факторами, негативно влияющими на скорость проведения выработок, являются простои забоев, связанные с разрушением угольных целиков, обрушением пород кровли и боков выработки [4, 5, 12, 13]. В пределах выемочного участка комплексно-механизированного очистного забоя (КМЗ) количество сопряжений подготовительных выработок достигает 40, более 80 % которых подвергаются влиянию веса подработанных очистным забоем пород кровли [16].

Сопряжения горных выработок являются одним из сложных объектов на шахтах и рудниках. Однако методы оценки их устойчивости не всегда обеспечивают безопасное эксплуатационное состояние выработок, так как не полностью учитывается множество факторов: формы и размеры сопряжений выработок, строение залежи, свойства боковых пород и др. [2, 3, 4, 7].

Основные виды простоев выявлены на сопряжении очистного забоя и выемочных выработок, что связано с необходимостью

установки крепи усиления, упрочнения вмещающих пород, ликвидации куполов и вывалов и др.

В этой связи актуальным является исследование геомеханического состояния неустойчивых пород в окрестности сопряжений горных выработок с целью обеспечения их безаварийной эксплуатации.

Для решения этой задачи требуется выявление зависимостей и закономерностей деформирования неустойчивых горных пород в окрестности сопряжений горных выработок. Это позволит на стадии разработки проектной документации принять решения, обеспечивающие устойчивость вмещающих пород на сопряжении горных выработок, снижение простоев очистных забоев и соблюдение безопасных условий труда.

Целью настоящего исследования является разработка методики обоснования параметров крепи подземных горных выработок на сопряжениях при отработке угольных пластов с неустойчивыми вмещающими породами.

Для достижения поставленной цели на первом этапе исследования методом физического моделирования решена задача: выявлена зависимость деформирования эквивалентного материала (ЭМ) в окрестности полостей, имитирующих сопряжения горных выработок.

Таблица 1

Типы и свойства моделируемых пород
Types and properties of simulated rocks

| Тип породы | Предел прочности при сжатии $\sigma_{\text{н}}$, МПа | Объемная масса пород $\gamma_{\text{н}}$, кг/м ³ |
|------------|---|--|
| Алеврит | 40 | 2500 |
| Уголь | 8,2 | 1200 |

Методика экспериментального исследования

Для исследования был принят метод физического моделирования, который позволяет сократить время и затраты, необходимые для выявления зависимостей деформирования эквивалентного материала в окрестности полостей, имитирующих сопряжения горных выработок [6, 7, 8, 11].

Типы и свойства моделируемых пород, а также физико-механические параметры ЭМ, удовлетворяющие критериям подобия [10], представлены в табл. 1, 2.

В соответствии с табл. 1 были рассчитаны прочностные характеристики эквивалентного материала для каждой породы по формулам, предложенным Г.Н. Кузнецовым [10].

Прочностные характеристики требуемого материала, эквивалентного горной породе, определялись из выражения

$$\sigma_{пч.с} = (R_c)_м = \frac{l}{L} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_n} (R_c)_н, \quad (1)$$

где $\sigma_{пч.с} = (R_c)_м$ – предел прочности при сжатии эквивалентного материала;

$(R_c)_н$ – предел прочности при сжатии натуральных образцов породы;

$\frac{l}{L}$ – линейный масштаб модели;

γ_m – объемная масса материала;

γ_n – объемная масса пород.

Объемная масса материала модели рассчитывалась по формуле:

$$\gamma_m = 0,6\gamma_n. \quad (2)$$

Эквивалентный материал выбран из двух составляющих – песка и парафина. Использовался кварцевый песок с диаметром зерен 0,30–0,16 мм. Парафин применялся технический СТО 00148636-004-2007.

В соответствии с результатами расчета и проведенных испытаний образцов при помощи гидравлического пресса «Азимут» БП-29, была подобрана рецептура состава смеси и определены пределы прочности эквивалентного материала при сжатии, соответствующие углю и алевролиту (табл. 2).

Для проведения физического моделирования был разработан стенд (рис. 1) [9, 14].

Таблица 2

Физико-механические параметры ЭМ
Physical and mechanical parameters of the EM

| Физико-механические параметры | Моделируемый тип пород | |
|---|--------------------------|--|
| | алевролит (кровля-почва) | уголь (пласт) |
| Состав компонентов ЭМ | песок+парафин (97 : 3) | песок+парафин+краситель (98,52 : 1,48) |
| Условия перемешивания ЭМ | с подогревом до 140 °С | |
| Лабораторный предел прочности ЭМ σ_m , МПа | 0,24 | 0,10 |
| Модуль деформации ЭМ E_d , МПа | 25 | 15 |

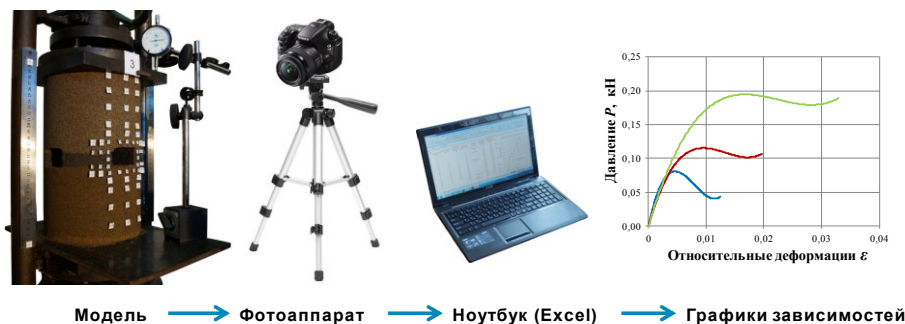


Рис. 1. Стенд для физического моделирования

Fig. 1. Stand for physical modeling

The experiment was performed for three options of physical models made of equivalent material (Fig. 2):

a) model 1 – an intact rock mass; b) model 2 – a rock mass including a single mine working;

c) model 3 – a rock mass with a mine working junction

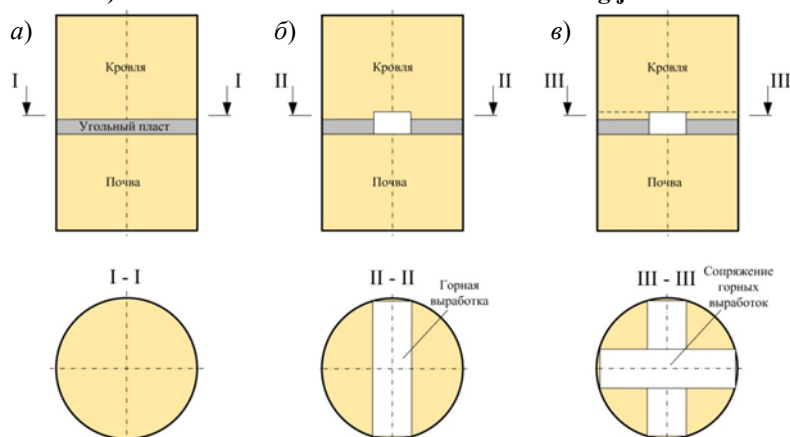


Рис. 2. Схемы моделей для физического моделирования:

a – модель 1 нетронутый массив горных пород; б – модель 2 массив с одиночной горной выработкой;
в – модель 3 массив с сопряжением горных выработок

Fig. 2. Schematics of the models for physical modeling:

a – model 1, an intact rock mass; b – model 2, a rock mass including a single mine working; c – model 3, a rock mass with a mine working junction

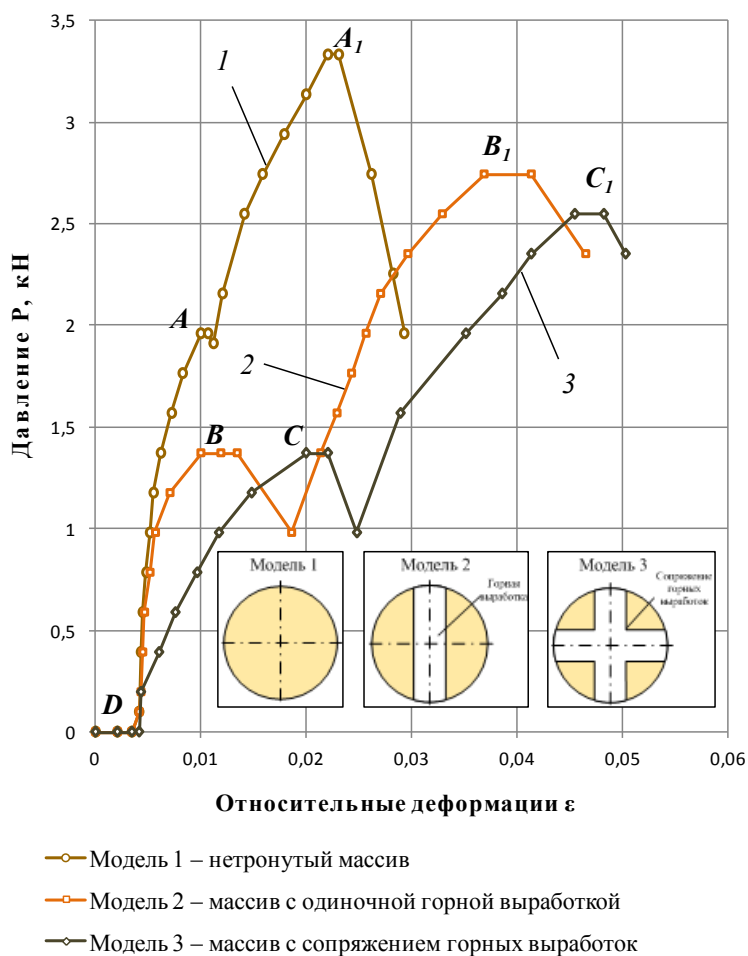


Рис. 3. Графики напряжения – относительные деформации эквивалентного материала физических моделей

Fig. 3. The graphs of relative strain versus stress for the equivalent material (EM) of the physical models

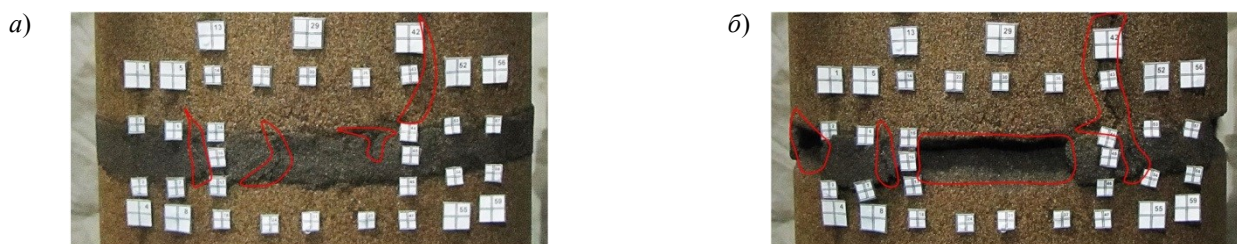


Рис. 4. Схема деформирования ЭМ (нетронутый массив)

Fig. 4. Seam EM deformation schematic – intact rock mass



Рис. 5. Схема деформирования пласта с одиночной горной выработкой

Fig. 5. Seam EM deformation schematic – rock mass including a single mine working



Рис. 6. Схема деформирования пласта при пересечении выработок

Fig. 6. Seam EM deformation schematic – rock mass with a mine working junction

Эксперимент проводился для трех вариантов физических моделей из эквивалентного материала (рис. 2):

а) модель 1 – нетронутый массив горных пород;

б) модель 2 – массив с одиночной горной выработкой;

в) модель 3 – массив с сопряжением горных выработок.

Результаты исследования. По результатам физического моделирования получены вертикальная удельная нагрузка трех моделей, а также следующие параметры НДС эквивалентного материала вокруг полостей, имитирующих горные выработки: вертикальные смещения, относительные деформации.

На основании результатов испытания моделей из эквивалентного материала и в соответствии с рекомендациями [15, 18] построены графики зависимости относительных

деформаций от вертикальной удельной нагрузки, представленные на рис. 3.

На основе работ [11, 17] оценка результатов исследований проводилась в следующей последовательности.

При нагружении модели 1 происходит обжатие ЭМ, как видно на графике (участок OD), после ЭМ переходит в упругое состояние (участок DA), при появлении первых трещин модель (массив) уплотняется, после интенсивного развития трещин в пласте происходит его выдавливание (рис. 4, а); нагрузка распределяется на вышележащие слои ЭМ, начинается упруго-пластичная деформация (участок AA₁), при переходе зоны (точка A₁) происходит разрушение ЭМ (рис. 4, б), после появления трещины на верхнем слое (в кровле) модели происходит релаксация напряжений.

При нагружении модели 2, ослабленной одним сквозным вырезом (полостью имити-

рующую горную выработку), наблюдается интенсивное развитие трещин в пласте (участок DB) с выдавливанием ЭМ по бокам горной выработки (рис. 5, а), после чего ЭМ, подобный алевролиту, прочность которого в 3–5 раз больше прочности угля, переходит в упруго-пластичное состояние (участок ВВ₁) и при увеличении вертикального давления достигает предельного состояния (точка В₁), и в результате разрушается (рис. 5, б).

Распределение деформаций ЭМ, ослабленного двумя полостями, имитирующими сопряжение горных выработок, представлено графиком 3 (рис. 3). Интенсивность деформирования материала, эквивалентного углю, в третьей модели выше по сравнению с моделями 1, 2, поскольку произошло выдав-

ливание ЭМ (угольный пласт) с замещением пустот на пересечении двух полостей, в результате верхний и нижний слой ЭМ (кровля-почва) практически сомкнулись (рис. 6, а, б).

Выводы.

1) Метод физического моделирования позволяет сократить время и затраты, необходимые для выявления закономерностей деформирования пород в окрестности сопряжений выработок в шахтных условиях.

2) Полученные результаты деформирования материалов, эквивалентных горным породам, предполагается использовать в качестве исходных данных при тестировании результатов физического и численного моделирования, а также при разработке паспортов крепления сопряжений горных выработок.

Библиографический список

1. Akhmetkhanov R. S. Probabilistic modeling in system engineering. IntechOpen, London, 2018, 278 p.
2. Басов В. В., Петров А. А., Васильев П. В. Сравнительная оценка соответствия расчётных и измеренных в натурных условиях смещений пород кровли подземных выработок // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов: сборник научных статей по материалам Междунар. науч.-практ. конф., 7-10 июня 2016 г.; под общ. ред. В.Н. Фрянова. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. № 2. С. 136-140.
3. Ермаков А. Ю., Васильев П. В., Фрянов В. Н., Сенкус В. В. Технология проведения и поддержания горных выработок большого сечения угольных шахт. Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2015. 135 с.
4. Жуков Е. М., Лугинин И. А., Кропотов Ю. И., Зырянов К. А., Басов В. В. Оценка влияния трещин на устойчивость пород в кровле подготовительных выработок угольных шахт // Вестник СибГИУ. 2015. №4 (14). С. 26-30.
5. Заславский Ю. З. Исследование проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна. М.: Недра, 1966. 180 с.
6. Казанин О. И., Зуев Б. Ю., Мешков А. А. Исследование на физических моделях процессов сдвижений при подземной разработке угольных пластов в поле шахты «Красноярская» ОАО «СУЭК-Кузбасс» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 5. С. 26-32.
7. Костюк С. Г., Ковалев Н. Б., Бедарев Н. Т., Любимов О. В., Семенов В. В., Ситников Г. А. Имитация отработки угольного пласта с наличием синклинали складки на модели из эквивалентных материалов // Вестник КузГТУ. 2014. № 5 (105). С. 67-70.
8. Ke Yang, Guangxiang Xie. An asymmetrical bolt supporting design of retreating coal roadway based on physical simulation in large dip coal seam/ AGH Journal of Mining and Geoengineering. vol. 36. №3 2012. pp. 453–461.
9. Lailiang Cai, Kan Wu., Qisheng Yu. A new method of equivalent material model deformation observation. International Journal of Modern Education and Computer Science (IJMECS), 2011, vol. 40-46, no. 5. Available at: <http://www.mecspress.org/ijmecs/ijmecs-v3-n5/v3n5-6.html> (Accessed 02 March 2019).
10. Кузнецов Г. Н., Будько М. Н., Васильев Ю. И., Шклярский М. Ф., Юревич Г. Г. Моделирование проявлений горного давления / Под ред. Г. Н. Кузнецова. Л.: Недра, 1968. 279 с.
11. Nan Li, Enyuan Wang, Maochen Ge, Jie Liu. The fracture mechanism and acoustic emission analysis of hard roof: a physical modeling study. Arabian Journal of Geosciences, 2015, vol. 1895-1902, no. 8. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-014-1378-y> (Accessed 02 March 2019)
12. Полевщиков Г. Я. Деформационно-волновые процессы в массиве горных пород при движении очистного забоя в угольных пластах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 5. С. 50-60.

13. Риб С. В., Басов В. В., Никитина А. М. Исследование влияния дизъюнктивных нарушений на состояние массива горных пород в окрестности подготовительной выработки // Вестник СибГИУ. 2016. № 1 (15). С. 17-20.

14. Rib S. V. The influence of rock interlayer location on the stress-strain state of the rock massif near the underground mine / S. V. Rib // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 206. – P. 1-4 (012011). – Режим доступа: <http://library.sibsiu.ru>

15. Seryakov V. M. Stress State of a Coal Pillar in Fully Mechanized Longwall Mining in Dislocation Zone / V. M. Seryakov, S. V. Rib, V. N. Fryanov // Journal of Mining Science. 2017. № 6. P. 1001-1008.

16. Singh R., Singh T. N. Investigation into the behaviour of a support system and roof strata during sublevel caving of a thick coal seam. Geotechnical and Geological Engineering 17. 1998, vol. 21-35.

17. Терещук Р. Н., Наумович А. В. Обеспечение устойчивости подготовительных выработок глубоких угольных шахт. Днепропетровск: 2015. 134 с.

18. Tsvetkov A. B., Pavlova L. D., Fryanov V. N. Construction of the approximant of complete diagram for rock deformation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 45. P. 1-7 (012009). URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/45/1/012009/pdf> (дата обращения 02.03.2019).

References

1. Akhmetkhanov R. S. Probabilistic modeling in system engineering. IntechOpen, London, 2018, 278 p.
2. Basov V. V., Petrov A. A., Vasiliev P. V. Comparative assessment of correlation of the calculated and in-situ measured displacements of rocks of roof in underground workings: Science-intensive technologies for extraction and use of mineral resources: Collection of scientific articles based on the materials from the International Scientific and Practical Conference, June 7-10, 2016; under the general editorship of Fryanov V.N.: Novokuznetsk, SibGIU Press, 2016, No. 2, pp. 136-140. (in Russ.)
3. Ermakov A. Yu., Vasiliev P. V., Fryanov V. N., Senkus V. V., 2015, Technology for drifting and supporting of heavy gauge workings at coal mines: Novokuznetsk, NFI KemGU, 135 p. (in Russ.)
4. Zhukov E. M., Luginin I. A., Kropotov Y. I., Zyryanov K. A., Basov V. V., 2015, Assessment of the effect of fractures on the stability of rocks in the roof of coal mine development workings: Vestnik (Bulletin) SibGIU, No. 4 (14), p. 26-30. (in Russ.)
5. Zaslavsky Yu. Z. The study of rock pressure manifestations in permanent workings of Donbas deep mines: Moscow, Nedra Press, 1966, 180 p. (in Russ.)
6. Kazanin O. I., Zuev B. Yu., Meshkov A. A., 2012, Physical model-based study of displacement processes at underground mining of coal seams in the field of Krasnoyarskaya mine of SUEK-Kuzbass OJSC: Mining information-analytical bulletin (scientific and technical magazine), No. 5, p. 26-32. (in Russ.)
7. Kostyuk S. G., Kovalev N. B., Bedarev N. T., Lyubimov O. V., Sementsov V. V., Sitnikov G. A., 2014, Simulation of extraction of a syncline-folded coal seam using a model made of equivalent materials: KuzGTU Bulletin, No. 5 (105), p. 67-70. (in Russ.)
8. Ke Yang, Guangxiang Xie. An asymmetrical bolt supporting design of retreating coal roadway based on physical simulation in large dip coal seam/ AGH Journal of Mining and Geoengineering. vol. 36. №3 2012. pp. 453–461.
9. Lailiang Cai, Kan Wu., Qisheng Yu. A new method of equivalent material model deformation observation. International Journal of Modern Education and Computer Science (IJMECS), 2011, vol. 40-46, no. 5. Available at: <http://www.mecspress.org/ijmecs/ijmecs-v3-n5/v3n5-6.html> (Accessed 02 March 2019)
10. Kuznetsov G. N., Budko M. N., Vasilyev Yu. I., Shklyarsky M. F., Yurevich G. G. Simulation of rock pressure manifestations: Edited by Kuznetsov, G.N., Nedra Press, 1968, 279 p. (in Russ.)
11. Nan Li, Enyuan Wang, Maochen Ge, Jie Liu. The fracture mechanism and acoustic emission analysis of hard roof: a physical modeling study. Arabian Journal of Geosciences, 2015, vol. 1895-1902, No. 8. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-014-1378-y> (Accessed 02 March 2019)
12. Polevshchikov G. Ya. "Deformation-wave" processes in rock mass when stoping face moving in coal seams: Physical and technical issues of mining, 2013, No. 5, p. 50-60. (in Russ.)
13. Rib S. V., Basov V. V., Nikitina A. M., 2016, Research of the effect of disjunctive dislocations on a rock mass condition in the vicinity of a development working: SibGIU Bulletin, No. 1 (15), p. 17-20. (in Russ.)
14. Rib S. V. The influence of rock interlayer location on the stress-strain state of the rock massif near the underground mine / S.V. Rib // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 206. Pp. 1-4(012011). Available at: <http://library.sibsiu.ru>
15. Seryakov V. M. Stress State of a Coal Pillar in Fully Mechanized Longwall Mining in Dislocation Zone / V. M. Seryakov, S. V. Rib, V. N. Fryanov // Journal of Mining Science. 2017. No. 6. Pp. 1001-1008. (in Russ.)

16. Singh R., Singh T. N. Investigation into the behaviour of a support system and roof strata during sublevel caving of a thick coal seam. *Geotechnical and Geological Engineering* 17. 1998, vol. 21-35.
17. Tereshchuk R. N., Naumovich A. V. Ensuring stability of development workings in deep coal mines: Dnepropetrovsk, 2015, 134 p. (in Russ.)
18. Tsvetkov A. B., Pavlova L. D., Fryanov V. N. Construction of the approximant of complete diagram for rock deformation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016. Vol. 45, pp. 1-7 (012009). Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/45/1/012009/pdf> (date of the applic. 02.03.2019). (in Russ.)