

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-49-55

Исследование процесса формирования зон опорного давления в системе «парные штреки»

Титов Н. В., Иванов С. И.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова,
Новочеркасск, Россия

Аннотация: Вопросы обеспечения геомеханической устойчивости горных выработок при разработке угольных месторождений всегда считались достаточно сложными и требовали особого внимания соответствующих служб горных компаний. Именно комплексные исследования формирования зон опорного давления в геомеханической системе «парные штреки», включающие численное моделирование, основанное на методе конечных элементов, позволили авторам получить новые результаты. Для моделирования использовались упругопластическая модель Мора – Кулона, а также физико-механические свойства угля и вмещающих пород. Моделирование проводилось для конкретных горно-геологических условий залегания антрацитового пласта k_2 . В одном программном модуле моделировались несколько стадий, позволяющих определить величину напряжений и смещений кровли в выемочных выработках на различных этапах формирования опорного давления впереди движущегося очистного забоя. В результате моделирования получены значения напряжений и смещений кровли в массиве вокруг выемочных выработок при различных стадиях проявления зон опорного давления, позволяющие применить метод планирования эксперимента для оптимизации параметров охранной конструкции в виде податливого целика. Данные исследования направлены на повышение эффективности охраны выемочных выработок путем оптимизации параметров охранных конструкций (податливого целика) для повышения производительности очистного забоя при отработке пологих антрацитовых пластов, в том числе опасным по горным ударам.

Ключевые слова: опорное давление, парные штреки, податливый целик, охрана выемочных выработок, антрацитовые пласты, ударобезопасность, численное моделирование.

Для цитирования: Титов Н. В., Иванов С. И. Исследование процесса формирования зон опорного давления в системе «парные штреки». *Горные науки и технологии*. 2020;5(1):49-55. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-49-55.

Study of Abutment Pressure Zone Formation in the System of "Paired Drifts"

N. V. Titov, S. I. Ivanov

Mining Institute, Kola Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract: The paper presents comprehensive studies of abutment pressure formation zones in the geotechnical system of "paired drifts", including numerical simulation based on the finite element method. For the simulation, the Mohr – Coulomb elastic-plastic model was used, as well as physico-mechanical properties of coal and host rocks. The simulation was carried out for specific mining and geological conditions of k_2 anthracite seam occurrence. In a software module, several stages were simulated, allowing to determine magnitude of stresses and displacements of the roof in stopes at various stages of abutment pressure formation in front of the advancing stoping face. As a result of the simulation, the values of the stresses and displacements of the roof in the rock mass around the stopes at various stages of the development of the abutment pressure formation zones were obtained, enabling using the experimental design method to optimize the parameters of adjustable pillar (as support structure). These studies are aimed at improving efficiency of stope protection by optimizing the parameters of protective support structures (adjustable pillars) to increase productivity of the stoping face during excavation of flat-lying anthracite seams, including rockburst-dangerous ones.

Keywords: abutment pressure, paired drifts, adjustable pillar, stope protection, anthracite seams, rockburst safety, numerical simulation.

For citation: Titov N. V., Ivanov S. I. Study of abutment pressure zone formation in the system of "paired drifts". *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):49-55. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-49-55.



Введение

Опыт отработки пологих антрацитовых пластов Восточного Донбасса на глубинах свыше 500 м показал неэффективность, а часто и невозможность повторного использования выемочных выработок из-за неудовлетворительного выполнения охранной функции искусственными ограждающими конструкциями (БДБ, БЖБТ и др.), что, в свою очередь, существенно влияет на снижение нагрузки на очистной забой [1, 3–5, 8].

В этих условиях актуальной является проблема оптимизации параметров межштрековых целиков, обладающих достаточной несущей способностью для охраны будущего вентиляционного штрека, с одной стороны, и обеспечивающих полную ударобезопасность – с другой, так как рассматриваемые пласты потенциально опасны по горным ударам [7, 11–14, 19].

В настоящее время достижение высоких нагрузок на очистной забой возможно только при однократном использовании выемочных штреков (с оставлением межъярусных охранных целиков для поддержания подготовительных выработок). Мировая практика показывает, что эффективные показатели работы очистных забоев достигаются при применении многоштрековых схем подготовки выемочных столбов. Рекордные показатели были достигнуты на шахтах США – 10 млн т/год; 1,6 млн т/мес.; 57 тыс. т/сут, в благоприятных горно-геологических условиях именно при использовании многоштрековых схем с оставлением целиков [16–18]. Опыт работы шахт США, достигших наивысших показателей в мире, представляет особый интерес при проектировании горных работ.

Нами предполагается изучить эффективность комплекса мероприятий по оформлению искусственной податливости антрацитовому целику с последующим его упрочнением для увеличения несущей способности при возможно минимальной его ширине.

Методы исследований

Для решения поставленной задачи на первом этапе необходимо провести исследования процесса формирования зон опорного давления в условной системе «парные штреки: конвейерный штрек верхней лавы – вентиляционный штрек нижней лавы».

В исследованиях нами закладываются наиболее сложные условия функционирования вентиляционного штрека нижней лавы – такие же, как при повторном его использовании. В этом случае нагрузки на штрек от опорного давления будут распределяться в следующих зонах:

- 1-я зона – проявление опорного давления при проведении выработки;
- 2-я зона – поддержание выработки в массиве до начала очистных работ;
- 3-я зона – формирование опорного давления впереди движущегося очистного забоя;
- 4-я зона – динамическое проявление опорного давления (тах) при подходе лавы (в окне лавы);
- 5-я зона – динамическое проявление опорного давления после прохода лавы с последующей стабилизацией опорного давления;
- 6-я зона – формирование опорного давления впереди движущегося второго очистного забоя;
- 7-я зона – динамическое проявление опорного давления (тах) при подходе второй лавы (в окне второй лавы);
- 8-я зона – динамическое проявление опорного давления после прохода лавы с последующей стабилизацией опорного давления [6, 15, 20].

Определяющим фактором (по величине нагрузок на крепь выемочных выработок) является опорное давление в окне лавы, которое характеризуется:

- формированием и обрушением зависящих консолей пород кровли в выработанном пространстве, создающих динамическую составляющую опорного давления;

– суммарным воздействием изгибающих моментов слоев пород, залегающих от пласта до поверхности.

Нами проведены комплексные исследования по формированию зон опорного давления в условной системе «парные штреки», включающие численное моделирование, которое совместно с эмпирическими методами и накопленным опытом позволяет выполнить оценку динамических процессов, происходящих в породном массиве при ведении горных работ. Применяемый способ основан на методе конечных элементов, также используется рациональный метод планирования эксперимента для решения геомеханической задачи [2, 9, 10].

Моделируемый процесс формирования зон опорного давления в геомеханической системе «парные штреки» выполнен в программной среде Plaxis. Основой для моделирования послужили горно-геологические условия шахты «Обуховская». Марка угля – А; пласт k_2 ; $\gamma = 1,67 \text{ т/м}^3$; $m = 0,98\text{--}1,35 \text{ м}$; $m_{\text{ср}} = 1,16 \text{ м}$; строение пласта – простое; $f = 2\text{--}3$; $\sigma_{\text{сж}} = 20 \text{ Мпа}$; $\alpha = 5\text{--}8^\circ$.

Непосредственная кровля, представленная песчаником мощностью $0,95 \text{ м}$; f – до 124; $\gamma = 2,68 \text{ т/м}^3$, переходящим в песчаный сланец ($m = 3,68 \text{ м}$; $f = 7\text{--}94$; $\gamma = 2,74 \text{ т/м}^3$), характеризуется как среднеустойчивая.

Основная кровля сложена песчаником ($m = 4,6 \text{ м}$; $f = 12\text{--}14$; $\gamma = 2,74 \text{ т/м}^3$). Песчаник

мелкозернистый, кварцевый, кремненый, крепкий. Основная кровля характеризуется как труднообрушающаяся на западе и среднеобрушающаяся на востоке.

Непосредственная почва представлена песчаным сланцем ($m = 0,9\text{--}1,2 \text{ м}$; $f = 7\text{--}9$; $\gamma = 2,71 \text{ т/м}^3$), почва пласта характеризуется как устойчивая, не склонная к пучению.

Для реализации нелинейного характера деформирования массива использовалась упругопластическая модель Мора – Кулона и физико-механические свойства угля и вмещающих пород.

Естественное напряженно-деформированное состояние массива задавалось вертикальными и горизонтальными напряжениями, приложенными внутри конечно-элементной модели. Вертикально сжимающие напряжения массива горных пород принимались равными весу столба горных пород до земной поверхности:

$$\sigma_z = \gamma H, \text{ т/м}^2.$$

Расчетная схема конечно-элементной модели (рис. 1) представляет собой участок массива с размерами $25 \times 90 \text{ м}$ с выработками прямоугольной формы сечения. Расстояния от моделируемых выработок до границ модели выбраны таким образом, чтобы исключить влияние на результаты моделирования граничных условий. По граням расчетной модели закреплены перемещения по всем осям.

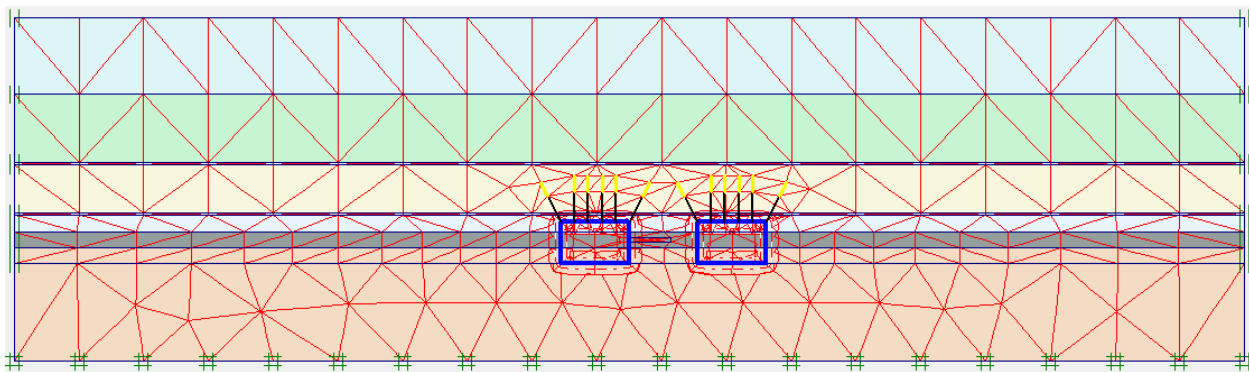


Рис. 1. Схема конечно-элементной модели

Fig. 1. Layout of the finite element model

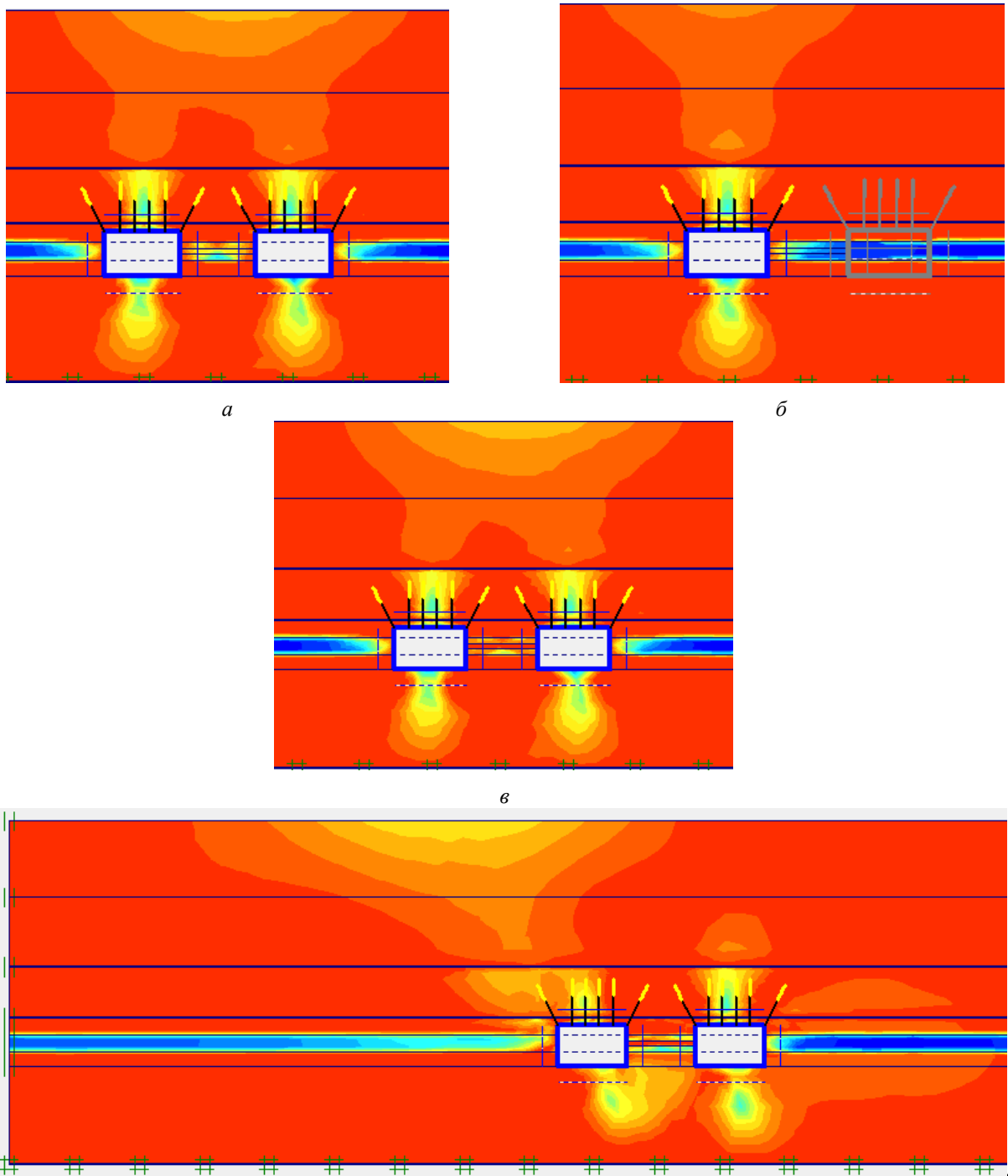


Рис. 2. Напряжения вокруг парных выработок:
a – 1-я стадия ; *б* – 2-я стадия ; *в* – 3-я стадия ; *г* – 4-я стадия

Fig. 2. Stresses around the paired workings:
a – 1st stage; *b* – 2nd stage; *c* – 3rd stage; *d* – 4th stage

Таблица 1

Полученные значения

The obtained values

Выработка	Стадия	Напряжение по контуру выработки, kN/m	Смещение кровли, ΔU , м
Конвейерный штрек	3	$-17,75 \cdot 10^3$	$82,64 \cdot 10^{-3}$
Конвейерный штрек	4	$26,79 \cdot 10^3$	$120,57 \cdot 10^{-3}$
Вентиляционный штрек	3	$-17,21 \cdot 10^3$	$81,51 \cdot 10^{-3}$
Вентиляционный штрек	4	$-18,20 \cdot 10^3$	$86,67 \cdot 10^{-3}$

Последовательно в одном программном модуле моделировалось несколько стадий (рис. 2):

– 1-я стадия – проведение конвейерного штрека опережающей проходкой вне зоны влияния очистных работ;

– 2-я стадия – проведение вентиляционного штрека для смежного выемочного столба вне зоны влияния очистных работ первого выемочного столба;

– 3-я стадия – задание искусственной податливости межштрековому целику;

– 4-я стадия – влияние максимального опорного давления впереди движущегося очистного забоя первого выемочного столба.

Для каждой стадии решались упругопластические задачи. При этом на каждой последующей стадии учитывались расчетные данные, полученные на предыдущей.

Результаты исследований

В результате моделирования получены значения напряжений и смещений кровли в массиве вокруг выемочных выработок при различных стадиях формирования опорного давления (табл. 1). Наибольший интерес представляют 3-я и 4-я стадии, поведение выработок при задании искусственной податливости

межштрековому целику и воздействия максимального опорного давления впереди движущегося очистного забоя.

Из полученных данных видно, что величина смещения кровли выработок значительно превышает расчетное смещение кровли, которое составляет $U_m = 37,50$ мм. Величину смещений кровли выработок можно нейтрализовать системой определенных мер, а именно оформлением охранной конструкции с оптимальными параметрами, способной выдерживать максимальные нагрузки от опорного давления.

Заключение

Полученные в результате моделирования данные используются для решения задачи по оптимизации параметров охранных конструкций (податливого целика), для чего будет применен рациональный метод планирования эксперимента с целью решения геомеханической задачи.

В настоящее время проведены лабораторные испытания закладочного материала с использованием связующих смол, построена матрица плана расчетного эксперимента.

Библиографический список

1. Бажин Н. П., Весков М. И., Комиссаров М. А. Расположение, охрана и поддержание подготовительных выработок в глубоких шахтах. *Труды ВНИМИ. Исследование проявлений горного давления на глубоких горизонтах*. Л.; 1971. С. 150–165.
2. Бауэр М. А., Дмитриенко В. А. Анализ напряженно-деформированного состояния монолитной бетонной крепи подземных сооружений некругового очертания. *Инженерный вестник Дона*. 2017;47(4(47)):199. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3916>.
3. Григорьев В. Л. Охрана и поддержание подготовительных и выемочных выработок, подверженных влиянию очистных работ. *Добыча угля подземным способом*. 1981;(7):20–22.
4. Иванов С. И., Титов Н. В., Ткачев В. А., Привалов А. А. Охрана горных выработок с помощью податливых целиков. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(8):159–166. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-161-166.
5. Иванов С. И., Титов Н. В., Ткачев В. А., Привалов А. А. Система разработки пластов средней и малой мощности длинными столбами по простиранию составлением породы в шахте. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(8):174–178. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-174-178.
6. Медведчук Н. Д. Влияние скорости подвигания очистного забоя на проявление горного давления при разработке пологих пластов. *Уголь Украины*. 1967;(4).
7. *Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонах к динамическим явлениям угольных пластах*. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_227032.

8. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР. 4-е изд., доп. Л.: ВНИМИ; 1986. 222 с.
9. Badalyan G. G., Dmitrienko V. A., Skomorokhov A. A. Resource-saving Technology of Building of Vertical Mine Working in Soil Original Research Article. *Procedia Engineering*. In: *2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)*. 2016;150:2293-2301. URL: <http://www.journals.elsevier.com/procedia-engineering>.
10. Bauer M. A., Dmitrienko V. A., Kapustin A. I. Assessment of Deformations of Earth`s Surface at Mine Construction on Sub-Soil Original Research Article. *Procedia Engineering*. In: *2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)*. 2016;150:2278-2286. URL: <http://www.journals.elsevier.com/procedia-engineering>.
11. Bolesta M., Menze G. Verfestigungsinjektion auf dem Bergwerk Ost mit einem hochfesten mineralischen Bindemittel. *Gluckauf*. 2003;(1):56–59.
12. Drzewiecki J. Neue Verfahren zur Bekämpfung der Gebirgsschlaggefahr. *Gluckauf*. 2002;(3):18–22.
13. Langhanki B. Planungskonzeption zur Doppelnutzung einer Rechteckankerstrecke. *Gluckauf*. 2002;(1):11.
14. Matusche T., Stratmann T. AVSA Parallelisiertes Ankern und Schneiden in Bogenstrecken. *Gluckauf*. 2002;(4):7–14.
15. Padera Z. Investigation of the influence of the bottom face movement speed on the manifestation of rock pressure during the development of a coal seam on models of equivalent materials. *Gluckauf*. 1969;(9).
16. Stive Fisor. Total Number of Longwall Faces Drops Below 50. *Coal Age*. 2009;(2):24–32.
17. Syd S. Peng. *Longwall Mining*. West Virginia University; 2006. 621 p.
18. Syd S. Peng. *Coal Mine Ground Control*. West Virginia University; 2008. 750 p.
19. Tönjes B., Voß H.-W., Mehlmann W. Kombiausbaustrecke auf dem Bergwerk Ewald/Hugo. *Gluckauf*. 2001;(1):28.
20. Varvo M. Influence of the extraction rate on the manifestation of deformations and pressure in the bottom-hole space. *Gluckauf*. 1969;(15).

References

1. Bazhin N. P., Veskov M. I., Komissarov M. A. Location, protection and maintenance of development drifts in deep mines. *Proceedings of VNIMI. The study of rock pressure manifestations at deep levels*. Leningrad; 1971. P. 150–165. (In Russ.).
2. Bauer M. A., Dmitrienko V. A. Analysis of stress-strain state of monolithic concrete lining of non-circular shape underground structures. *Don Engineering Bulletin*. 2017;47(4(47)):199. Available from: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3916>. (In Russ.).
3. Grigoriev V. L. Protection and maintenance of development drifts and stopes subject to stoping influence. *Underground coal mining*. 1981;(7):20–22. (In Russ.).
4. Ivanov S. I., Titov N. V., Tkachev V. A., Privalov A. A. Mine working protection using adjustable pillars. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(8):159–166. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-161-166. (In Russ.).
5. Ivanov S. I., Titov N. V., Tkachev V. A., Privalov A. A. Method of longwall mining of medium and low thickness seams along the strike with abandonment of rock in mine. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(8):174–178. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-174-178.
6. Medvedchuk N.D. Effect of stoping face advance rate on rock pressure manifestation when extracting flat-lying seams. *Coal of Ukraine*. 1967;(4). (In Russ.).
7. Recommendations for safe mining of coal seams prone to dynamic phenomena. Available from: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_227032/ (in Russ.).
8. *Guidelines for rational location, protection, and maintenance of mine workings at coal mines of the USSR*. 4th Ed., add. Leningrad: VNIMI Publ.; 1986. 222 p. (in Russ.).
9. Badalyan G. G., Dmitrienko V. A., Skomorokhov A. A. Resource-saving Technology of Building of Vertical Mine Working in Soil Original Research Article. *Procedia Engineering*. In: *2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)*. 2016;150:2293-2301. Available from: <http://www.journals.elsevier.com/procedia-engineering>.
10. Bauer M. A., Dmitrienko V. A., Kapustin A. I. Assessment of Deformations of Earth`s Surface at Mine Construction on Sub-Soil Original Research Article. *Procedia Engineering*. In: *2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)*. 2016;150:2278-2286. Available from: <http://www.journals.elsevier.com/procedia-engineering>.
11. Bolesta M., Menze G. Verfestigungsinjektion auf dem Bergwerk Ost mit einem hochfesten mineralischen Bindemittel. *Gluckauf*. 2003;(1):56–59.
12. Drzewiecki J. Neue Verfahren zur Bekämpfung der Gebirgsschlaggefahr. *Gluckauf*. 2002;(3):18–22.

13. Langhanki B. Planungskonzeption zur Doppelnutzung einer Rechteckankerstrecke. *Gluckauf*. 2002;(1):11.
14. Matusche T., Stratmann T. AVSA Parallelisiertes Ankern und Schneiden in Bogenstrecken. *Gluckauf*. 2002;(4):7–14.
15. Padera Z. Investigation of the influence of the bottom face movement speed on the manifestation of rock pressure during the development of a coal seam on models of equivalent materials. *Gluckauf*. 1969;(9).
16. Stive Fiscor. Total Number of Longwall Faces Drops Below 50. *Coal Age*. 2009;(2):24–32.
17. Syd S. Peng. *Longwall Mining*. West Virginia University; 2006. 621 p.
18. Syd S. Peng. *Coal Mine Ground Control*. West Virginia University; 2008. 750 p.
19. Tönjes B., Voß H.-W., Mehlmann W. Kombiausbaustrecke auf dem Bergwerk Ewald/Hugo. *Gluckauf*. 2001;(1):28.
20. Varvo M. Influence of the extraction rate on the manifestation of deformations and pressure in the bottom-hole space. *Gluckauf*. 1969;(15).