

Технология проведения гидравлическим способом подземных подготовительных выработок на склонных к газодинамическим явлениям угольных пластах

Васильев П. В.¹, Крестьянинов А. В.², Петрова О. А.², Шмаков И. К.^{2*}

¹ Сибирская экспертная организация ООО «СИБЭО», г. Новокузнецк, Россия

² Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

*e-mail: shmakov.ik@yandex.ru

Реферат

Целью исследований в настоящей статье является создание технологии скоростной проходки подземных подготовительных выработок на склонных к газодинамическим явлениям угольных пластах посредством совмещения операций проведения разгрузочных дегазационных полостей и выемки угля гидравлическим способом.

Методика проведения исследований. Для обеспечения безопасности горных работ и повышения темпов проведения подготовительных выработок на метаноносных угольных пластах разработаны методика прогнозирования и технологические решения предотвращения внезапных выбросов газа, угля и взрывов метана. Сущность технологических решений состоит в совмещении процессов формирования разгрузочных дегазационных полостей впереди подготовительного забоя и выемки угля при помощи высоконапорной гидравлической струи. Для реализации технологических решений разработана гидрофицированная механизированная шагающая крепь с установкой на ней гидромонитора с дистанционным управлением и средств для гидравлического разрушения угольного пласта в подготовительном забое. Для обоснования параметров и пространственного положения разгрузочных полостей и расчета давления метана в угольном пласте разработан комплекс компьютерных программ, обеспечивающий прогноз размеров устойчивых угольных целиков между дегазационными полостями и состояния пород кровли.

Выводы. В статье обоснована научная идея совмещения процессов дегазации газоносного пласта и выемки угля гидравлическим способом с дистанционным управлением средств выемки дегазации, адаптирована механизированная крепь шагающего типа, оснащенная средствами проведения разгрузочных дегазационных полостей, а также адаптирован к условиям проходки подготовительных выработок компьютерный программный комплекс.

Ключевые слова: скоростная проходка; подготовительные выработки; гидравлическая выемка; модифицированная крепь; крепь шагающего типа; гидроотбойка.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075–15–2022–1190).

Введение. При разработке метаноносных угольных пластов применяется система безопасности, включающая прогноз выбросоопасности, применение региональных и локальных способов предотвращения внезапных выбросов метана и угля в горные выработки [1, 2]. Однако на практике способы и средства мониторинга и прогноза состояния метана в угольном пласте не всегда обеспечивают достоверное выявление пространственного положения и параметров концентраторов газа в окрестности подготовительного забоя, что сопровождается внезапными опасными газодинамическими событиями. Это подтверждается статисти-

кой внезапных выбросов угля и метана [3]. С целью снижения риска внезапных газодинамических явлений в окрестности проходческого забоя проводятся мероприятия по дегазации угольных пластов (*Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений»*. Приказ Ростехнадзора от 10.12.2020 № 515), [4], что требует остановки забоя и, как следствие, снижения темпов проходки выработки.

Цель исследований в настоящей статье в связи с этим – создание технологии скоростной проходки подземных подготовительных выработок на склонных к газодинамическим явлениям угольных пластах посредством совмещения операций проведения разгрузочных дегазационных полостей и выемки угля гидравлическим способом.

Постановка задачи. Для достижения поставленной цели предлагается применение в проходческом забое механизированной гидрофицированной крепи шагающего типа [5–8] (рис. 1), модернизированной согласно основным положениям патента [9].

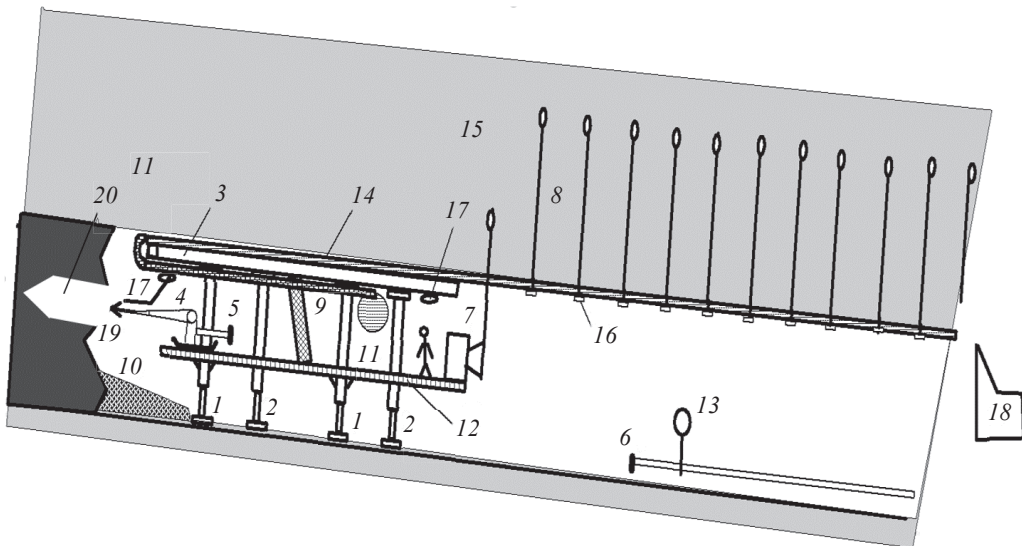


Рисунок 1. Механизированная гидрофицированная крепь шагающего типа с рабочей платформой для монтажа на ней крепеустановщика и гидромонитора высоконапорной гидравлической выемки угля и формирования разгрузочных полостей

Figure 1. Hydroficated mechanized walking support with a working platform for a support setting machine and a hydraulic monitor for high-pressure hydraulic excavation of coal and formation of relieve cavities

На рис. 1 приняты следующие обозначения элементов технологии проведения выработки: 1, 2 – гидростойки; 3 – перекрытие секции крепи; 4 – гидромонитор; 5, 6 – высоконапорный трубопровод; 7 – крепеустановщик; 8 – анкера; 9 – воздухопроницаемая ограждающая перемычка; 10 – водоугольная пульпа; 11 – рулон решетчатой стальной затяжки; 12 – рабочая платформа; 13 – задвижка для переключения потока высоконапорной воды; 14 – решетчатая стальная затяжка; 15 – кровля выработки; 16 – подхват; 17 – камеры видеонаблюдения; 18 – пульт управления; 19 – отрабатываемая впереди подготовительного забоя заходка; 20 – разгрузочная дегазационная полость.

Идея создания и реализации технологии проведения гидравлическим способом подземных подготовительных выработок на склонных к газодинамическим явлениям угольных пластах состоит в научном обосновании параметров разгрузочных дегазационных полостей, оценке устойчивости пород кровли и угольных целиков между полостями, прогнозе параметров метановыделения и дистанционной выемки угля впереди подготовительного забоя [10].

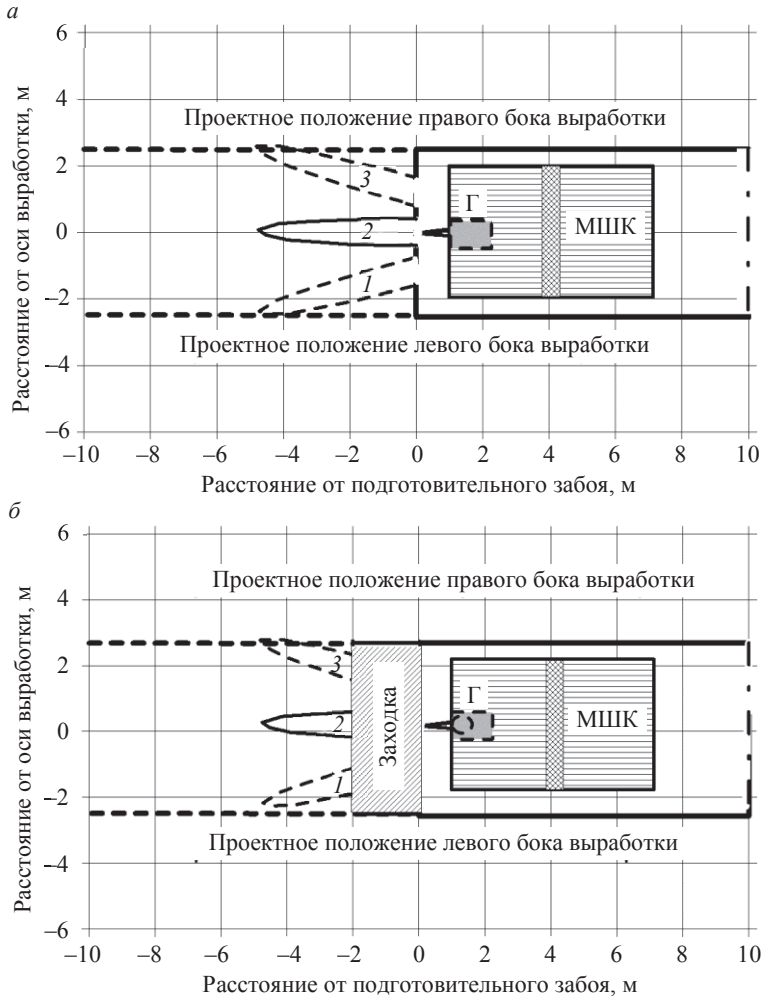


Рисунок 2. Схемы проведения разгрузочных полостей – а и выемки угля гидравлическим способом в проходческом забое – б: 1–3 номера разгрузочных полостей; Г – гидромонитор; МШК – механизированная шагающая крепь

Figure 2. Schemes of driving relieve cavities – а and coal excavation by a hydraulic method in the drifting face – б: 1–3 numbers of relieve cavities; Г – hydraulic monitor; МШК – mechanized walking support

Схема формирования разгрузочных полостей обоснована в монографии [1] и реализована на шахтах Воркутского месторождения, где применяется традиционная комбайновая проходка выработок с опережающей гидравлической выемкой угля в разгрузочных полостях. Однако отмечается, что при реализации этого способа возникали внезапные выбросы угля и газа, а также опасные производ-

ственные ситуации с вынужденными остановками забоя. Следовательно, для повышения скорости подвигания очистного забоя необходимо совместить операции дистанционного управления процессами формирования разгрузочных полостей, выемки угля, дегазации угольного пласта, транспорта горной массы, обеспыливания и проветривания призабойного пространства с организацией дистанционного видеонаблюдения и мониторинга технологических процессов. Этим требованиям удовлетворяет предлагаемая технологическая схема (рис. 1).

Для прогноза параметров и пространственного расположения разгрузочных полостей проведено решение трехмерной геомеханической задачи распределения напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности подготовительного забоя.

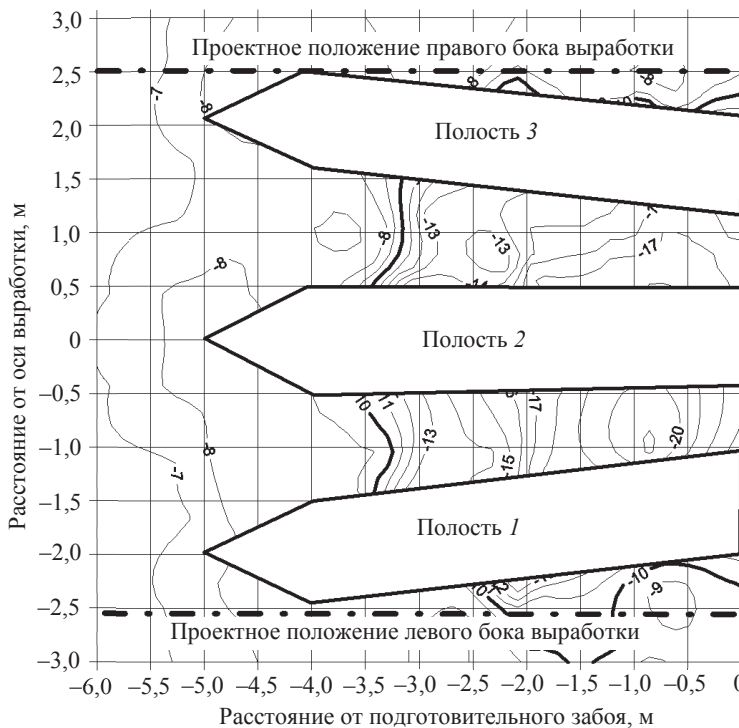


Рисунок 3. Распределение вертикальных напряжений, МПа, в угольных целиках между соседними разгрузочными полостями в средней угольной пачке

Figure 3. Distribution of vertical stresses (MPa) in coal pillars between neighboring relieve cavities in the middle coal

Подготовительная выработка проводится по угольному пласту пологого падения средней мощности. Подготовительный забой оснащается механизированной гидрофицированной крепью шагающего типа (рис. 1). Рассматриваются три варианта модели напряженно-деформированного состояния массива горных пород: до начала формирования разгрузочных полостей, после проведения разгрузочных полостей, после выемки угля в заходке вблизи забоя при наличии впереди разгрузочных дегазационных полостей (рис. 2). По результатам исследований необходимо обосновать параметры разгрузочных полостей, оценить устойчивость угольных целиков между ними, а также влияние разгрузочных полостей на устойчивость пород кровли в подготовительном забое.

Выявление закономерностей распределения геомеханических параметров при разном расположении разгрузочных дегазационных полостей осуществлено на основе результатов моделирования методом конечных элементов с использованием пакета компьютерных программ [11]. Проводился анализ следующих результатов моделирования: смещения пород кровли, вертикальные напряжения в угольном пласте впереди очистного забоя, отношение остаточной прочности угля к исходной. Установлено, что наиболее существенными для оценки напряженно-деформированного состояния угольного пласта являются вертикальные напряжения, потому основные исследования посвящены анализу изменения этих напряжений в разных вариантах расположения разгрузочных полостей и подготовительного забоя (рис. 2).

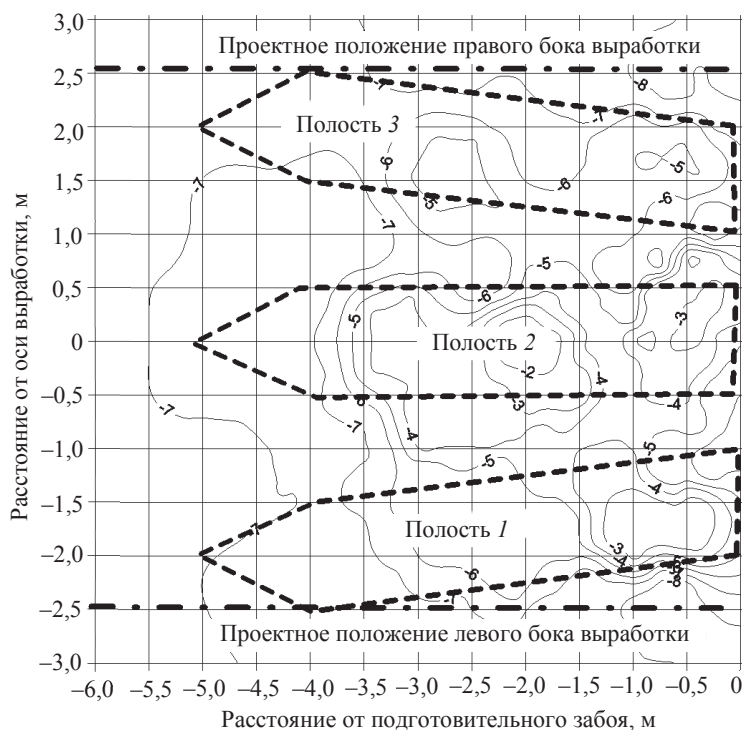


Рисунок 4. Распределение вертикальных напряжений, МПа, в верхней угольной пачке над разгрузочными полостями
 Figure 4. Distribution of vertical stresses (MPa) in the top coal above the relieve cavities

Порядок и результаты моделирования. Для моделирования приняты следующие горно-геологические и горнотехнические условия: мощность пласта и высота выработки – 3 м; прочность угля при сжатии – 10 МПа; мощность пород непосредственной кровли – 6 м; предел прочности при сжатии 30 МПа; мощность пород основной кровли – 12 м; предел прочности при сжатии – 60 МПа; породы почвы представлены аргиллитами, прочность при сжатии – 40 МПа; глубина разработки – 500 м; ширина выработки – 5 м. Угольный пласт при численном моделировании напряженно-деформированного состояния условно разделен на три пачки, разгрузочные полости проводятся по средней пачке пласта.

На рис. 3 показаны оседания пород кровли до и после проведения разгрузочных полостей, а также изолинии распределения вертикальных напряжений в угольных

целиках между соседними разгрузочными полостями в средней угольной пачке. Согласно рис. 3, вертикальные напряжения (20 МПа) в угольных целиках в два раза превышают предел прочности угля в угольном пласте (10 МПа), следовательно, целики будут разрушены. Это подтверждается производственным опытом на шахтах Воркутинского месторождения [1], когда при выемке угля в разгрузочных полостях были отмечены звуки разрушения угля, а в некоторых случаях и внезапные выбросы угля и газа. Поэтому, для исключения случаев травмирования персонала, выемка угля в полостях должна осуществляться только с дистанционным управлением и при отсутствии в забое электрооборудования [12]. Перечень оборудования для системы позиционирования проходческого горного оборудования в шахте можно изучить в статье [13]. Наиболее вероятный риск возникновения опасных геодинамических явлений следует ожидать в угольном целике между полостями 1 и 3 (рис. 3).

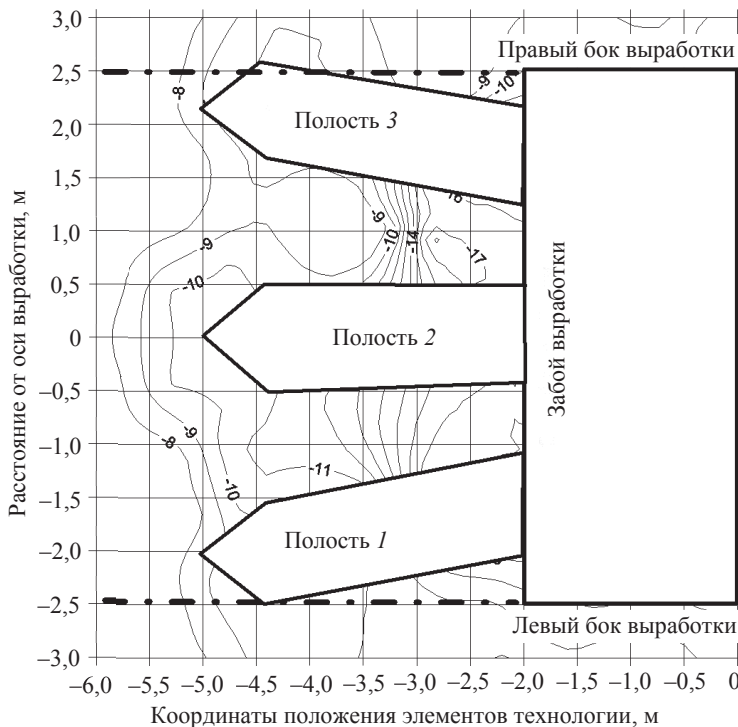


Рисунок 5. Распределение вертикальных напряжений, МПа, в угольных целиках между соседними разгрузочными полостями в средней угольной пачке после выемки заходки шириной 2 м в подготовительном забое
Figure 5. Distribution of vertical stresses (MPa) in coal pillars between neighboring relieve cavities in the middle coal after excavation of a 2 m wide drift in the development face

Анализ напряженно-деформированного состояния пород кровли и верхней угольной пачки показал (рис. 4), что максимальные вертикальные напряжения (7 МПа) не превышают предел прочности угля при сжатии (10 МПа). Следовательно, при формировании разгрузочных полостей вероятность обрушения угля верхней пачки относительно низкая. Однако при возникновении внезапного выброса угля из угольных целиков между разгрузочными полостями среднего слоя возможно разрушение угля верхней пачки. Это неоднократно отмечалось при

гидромониторной выемке угля на гидрошахтах Кузбасса [14]. Поэтому выемку угля в разгрузочных полостях следует осуществлять только с дистанционным управлением технологическими процессами.

После формирования разгрузочных полостей и проведения мероприятий по обеспечению безопасности работ начинается дистанционная выемка угля в подготовительном забое заходками шириной 2–3 м (рис. 5).

Согласно графикам распределения вертикальных напряжений, по мере выемки угля в заходках увеличиваются величины вертикальных напряжений впереди границ разгрузочных полостей. Таким образом формируются два забоя: на дальней границе полостей – дегазационный пояс, на краевой части обрабатываемого угольного пласта – подготовительный забой. Рекомендуемое расстояние между границей зоны дегазации и поверхностью пласта в подготовительном забое составляет 3–5 м.

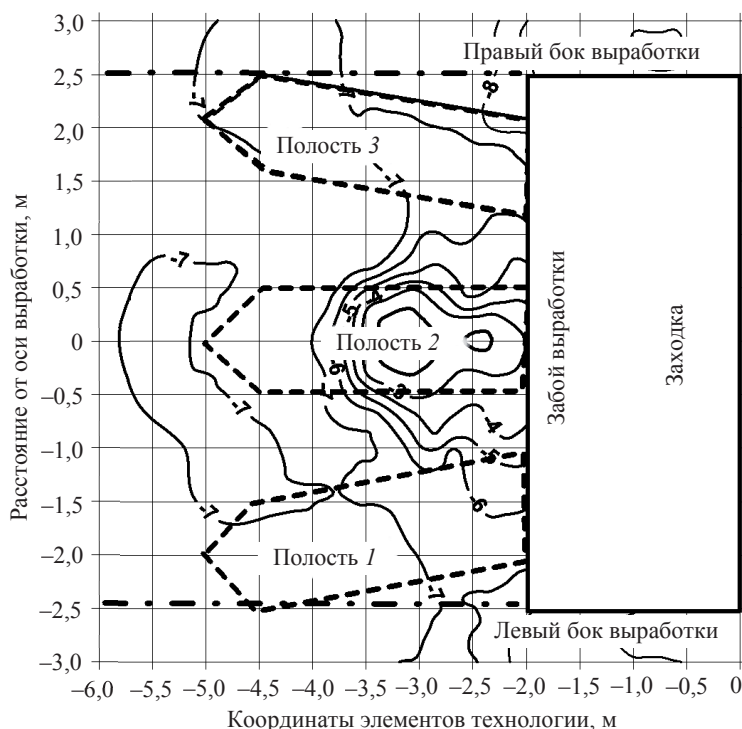


Рисунок 6. Распределение вертикальных напряжений, МПа, в верхней угольной пачке после выемки заходки шириной 2 м в подготовительном забое

Figure 6. Distribution of vertical stresses (MPa) in the top coal after excavation of a 2 m wide drift in the development face

При выемке угля в заходке происходит изменение вертикальных напряжений в верхней угольной пачке (рис. 6). Величины напряжений не превышают предел прочности угля при сжатии, т. е. верхняя угольная пачка находится в зоне разгрузки в устойчивом состоянии. Однако для обеспечения этого равновесия энергии горного давления и предельной прочности угля и исключения формирования концентраторов повышенного горного давления и давления метана необходимо выполнять следующие циклы при безопасных условиях: крепление выработки, формирование разгрузочных полостей, гидравлическая выемка заходками угольного пласта.

Выводы. Обоснована научная идея совмещения процессов дегазации газоносного пласта и выемки угля гидравлическим способом с дистанционным управлением средств выемки дегазации.

Адаптирована к условиям проведения на газоносных пластах подготовительных выработок механизированная крепь шагающего типа, оснащенная средствами проведения разгрузочных дегазационных полостей, выемки угля, крепления пород и транспорта водоугольной пульпы.

Адаптирован к условиям проходки подготовительных выработок компьютерный программный комплекс, обеспечивающий прогноз параметров напряженно-деформированного состояния массива и технологии совмещения процессов дегазации и выемки угля в подготовительном забое.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесниченко Е. А., Артемьев В. Б., Колесниченко И. Е. Внезапные выбросы метана: теоретические основы. М: Горное дело, 2013. 232 с.
2. Развитие физико-технических и физико-химических геотехнологий освоения месторождений полезных ископаемых, опасных по газо- и геодинамическим явлениям: в 3 т. Т. 2. Физико-техническая геотехнология освоения угольных месторождений / Еременко А. А. [и др.]. Новосибирск: СО РАН, 2023. 148 с.
3. Кулик А. И., Тимченко А. Н., Костеренко В. Н., Кобылкин С. С. Особенности моделирования аэрогазодинамики очистного забоя угольной шахты // Уголь. 2023. № 3. С. 75–78. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-3-75-78
4. Инструкция по дегазации угольных шахт. Сер. 05. Вып. 22. М.: ЗАО Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, 2012. 250 с.
5. Малахов Ю. В., Никитенко С. М., Фрянов В. Н. Предотвращение горно-геологических рисков обрушений пород кровли при проходке подземных горных выработок // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 6. С. 60–69.
6. Nikitenko S., Nikitenko M., Kizilov S., Khudonogov D. Robotic walking module as underground mining safety device // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 498. Art. 03014. DOI: 10.1051/e3sconf/202449803014
7. Nikitenko S. M., Kubrin S. S., Malakhov Y. V. Safety ensuring in the implementation of new technologies for tunneling and production faces // Sustainable development of mountain territories. 2022. No. 4. P. 615–622. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-615-622
8. Крестовоздвиженский П. Д., Клишин В. И., Никитенко С. М., Герике П. Б. Выбор формы армирующих вставок для тангенциальных поворотных резцов горных машин // ФТПРПИ. 2014. № 6. С. 107–115.
9. Способ проведения подготовительной выработки и механизированная крепь для его осуществления: пат. 2739010 Рос. Федерация. № 2020113988; заявл. 03.04.2020; опубл. 21.12.2020. Бул. № 36. 2 с.
10. Marshall J., Bonchis A., Nebot E., Scheduling S. Springer handbook of robotics (2nd Ed.). 2014. 37–39 p. DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1_59
11. Фрянов В. Н., Петрова О. А., Петрова Т. В. Комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования формирования и распределения опасных зон в газоносном геомассиве // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». 2015. № 08–09(75–76). 4 с.
12. Xigui Wang, Jie Tang, Yongmei Wang, Chen Li. A cooperative control method for excavation support robot with desired position/posture // Applied Sciences. 2022. DOI: 10.3390/app12189262
13. Łukasz Bołoz, Witold Biały. Automation and robotization of underground mining in Poland // Applied Sciences. 2020. No. 10. P. 5–6. DOI: 10.3390/app10207221
14. Интегрированные технологии добычи угля на основе гидромеханизации / Л. А. Пучков [и др.]. М.: МГГУ, 2000. 296 с.
15. Сентябов С. В. Управление горным давлением при освоении глубокозалегających месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 2. С. 62–73. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-62-73

Поступила в редакцию 3 апреля 2024 года

Сведения об авторах:

Васильев Павел Валентинович – кандидат технических наук, генеральный директор Сибирской экспертной организации. E-mail: vasilyevvp@bk.ru

Крестьянинов Александр Владимирович – аспирант кафедры геотехнологии Сибирского государственного индустриального университета. E-mail: krestyaninov261096@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-7892-3720>

Петрова Ольга Александровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры геотехнологии Сибирского государственного индустриального университета. E-mail: ol_petrova@mail.ru

Шмаков Иван Константинович – аспирант кафедры геотехнологии Сибирского государственного индустриального университета. E-mail: shmakov.ik@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0000-8412-493X>

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-50-59

Technology of driving underground development openings by a hydraulic method at coal seams prone to gas dynamic hazards

Pavel V. Vasiliev¹, Aleksandr V. Krestianinov², Olga A. Petrova², Ivan K. Shmakov²

¹ Siberian Expert Organization SIBEO, Novokuznetsk, Russia.

² Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.

Abstract

Research objective is to create a technology for high-speed driving of underground development openings at coal seams prone to gas dynamic hazards by means of combining the operations of driving relieve degassing cavities and coal mining by a hydraulic method.

Methods of research. To ensure mining safety and increase the rate of driving development openings at methane-bearing coal seams, a method of forecasting has been developed together with technological solutions for preventing gas, coal and methane outbursts. The essence of the technological solutions consists in combining the operations of driving relieve degassing cavities ahead of the development face and coal mining by a high-pressure hydraulic jet. A hydroficated mechanized walking support with a remote-control hydraulic monitor and with means of coal seam hydraulic destruction in the development face is developed in order to implement the technological solutions. To justify the parameters and spatial position of relieve cavities and calculate methane pressure in a coal seam, a system of computer programs has been developed, which forecasts the size of stable coal pillars between the degassing cavities and roof rocks.

Conclusions. The scientific idea was proved of combining the processes of gas-bearing formation degassing and coal extraction by a hydraulic method with degassing means remote control. A mechanized walking support equipped with the means of driving relieve degassing cavities was adapted. Computer software was also adapted to the conditions of driving development openings.

Keywords: high-speed driving; development openings; hydraulic excavation; modified walking support; hydraulic stripping.

The research was carried out with the financial support from the Ministry of Education of Science of the Russian Federation (Agreement no. 075–15-2022-1190).

REFERENCES

1. Kolesnichenko E. A., Artemiev V. B., Kolesnichenko I. E. *Methane outbursts: theoretical background*. Moscow: Gornoe delo Publishing; 2013. (In Russ.)
2. Eremenko A. A. et al. *Development of physical-technical and physical-chemical geotechnologies for the development of mineral deposits prone to gas and geodynamic hazards: in 3 Vol. Vol. 2. Physico-technical geotechnology of coal deposits development*. Novosibirsk: SB RAS Publishing, 2023. (In Russ.)
3. Kulik A. I., Timchenko A. N., Kosterenko V. N., Kobylkin S. S. Features of the coal mine face aerogasodynamics modelling. *Ugol = Coal*. 2023; 3: 75–78. (In Russ.) Available from: doi: 10.18796/0041-5790-2023-3-75-78
4. *Instruction on coal mines degasification*. Ser. 05. Iss. 22. Moscow: CJSC Scientific technical center of industrial safety problems research Publishing; 2012. (In Russ.)
5. Malakhov Iu. V., Nikitenko S. M., Frianov V. N. Prevention of mining and geological risks of roof collapse when driving underground workings. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2023; 6(170): 60–69. (In Russ.)
6. Nikitenko S., Nikitenko M., Kizilov S., Khudonogov D. Robotic walking module as underground mining safety device. In: *E3S Web of Conferences*. 2024; 498: 03014. Available from: doi: 10.1051/e3sconf/202449803014

7. Nikitenko S. M., Kubrin S. S., Malakhov Y. V. Safety ensuring in the implementation of new technologies for tunneling and production faces. In: *Sustainable development of mountain territories*. 2022; 4: 615–622. Available from: doi: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-615-622

8. Krestovozdvizhenskii P. D., Klishin V. I., Nikitenko S. M., Gerike P. B. Selecting shape of reinforcement insertions for tangential swivel cutters of mining machines. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2014; 6: 107–115. (In Russ.)

9. Klishin V. I., Anferov B. A., Kuznetsova L. V., Nikitenko S. M., Malakhov Iu. V., Mefodiev S. I., Shundulidi I. A. *Method for preparatory mine working and mechanized support for implementation thereof*. Patent RF; 2020. (In Russ.)

10. Marshall J., Bonchis A., Nebot E., Scheduling S. *Springer handbook of robotics (2nd Edition)*. 2014: 37–39. Available from: doi: 10.1007/978-3-319-32552-1_59

11. Frianov V. N., Petrova O. A., Petrova T. V. A set of problem-oriented programs for modeling the formation and distribution of hazardous zones in a gas-bearing geomass. *Khroniki obiedinennogo fonda elektronnykh resursov "Nauka i obrazovanie" = Chronicles of the Joint Fund of Electronic Resources "Science and Education"*. 2015; 08–09(75–76): 4. (In Russ.)

12. Xigui Wang, Jie Tang, Yongmei Wang, Chen Li. A cooperative control method for excavation support robot with desired position/posture. *Applied Sciences*. 2022. Available from: doi: 10.3390/app12189262

13. Łukasz Bołoz, Witold Biały. Automation and robotization of underground mining in Poland. *Applied Sciences*. 2020; 10: 5–6. Available from: doi: 10.3390/app10207221

14. Puchkov L. A. et al. *Integrated technologies of coal mining based on hydraulic excavation*. Moscow: MSMU Publishing; 2000. (In Russ.)

15. Sentiabov S. V. Rock pressure management during deep deposit development. *Minerals and Mining Engineering*. 2023; 2: 62–73 (In Russ.). Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2023-2-62-73

Received 3 April 2024

Information about the authors:

Pavel V. Vasiliev – PhD (Engineering), Director General, Siberian Expert Organization SIBEO. E-mail: vasilyevpv@bk.ru

Aleksandr V. Krestianinov – PhD student, Department of Geotechnology, Siberian State Industrial University. E-mail: krestyaninov261096@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-7892-3720>

Olga A. Petrova – PhD (Engineering), Associate Professor, associate professor of the Department of Geotechnology, Siberian State Industrial University. E-mail: ol_petrova@mail.ru

Ivan K. Shmakov – PhD student, Department of Geotechnology, Siberian State Industrial University. E-mail: shmakov.ik@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0000-8412-493X>

Для цитирования: Васильев П. В., Крестьянинов А. В., Петрова О. А., Шмаков И. К. Технология проведения гидравлическим способом подземных подготовительных выработок на склонных к газодинамическим явлениям угольных пластах // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 4. С. 50–59. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-50-59

For citation: Vasiliev P. V., Krestianinov A. V., Petrova O. A., Shmakov I. K. Technology of driving underground development openings by a hydraulic method at coal seams prone to gas dynamic hazards. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 4: 50–59 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-50-59