

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

**ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД, РУДНИЧНАЯ
АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА
GEOMECHANICS, DESTRUCTION OF ROCKS BY EXPLOSION,
MINE AEROGASDYNAMICS AND MINING THERMOPHYSICS**

Научная статья

УДК 622.245; 539.3

DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-77-83

**ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА
УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ ПРИ ПОИНТЕРВАЛЬНОМ РАЗРЫВЕ**

**Клишин Владимир Иванович¹, Тайлаков Олег Владимирович^{1,2},
Уткаев Евгений Александрович¹, Соколов Сергей Владиславович¹**

¹ Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН² АО «НЦ ВостНИИ»

*для корреспонденции: klishinvi@ic.sbras.ru

**Информация о статье**

Поступила:

29 сентября 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

10 декабря 2023 г.

Принята к публикации:

12 декабря 2023 г.

Опубликована:

21 декабря 2023 г.

Ключевые слова:

дегазация, дегазационные скважины, газоотдача, угольный пласт, поинтервальный гидроразрыв, сдвоенный пакер, мониторинг гидровоздействия, сейсмическое просвечивание

Аннотация.

Свойства углей определяются ботанической природой исходного растительного материала, что обуславливает разницу в типах витринита в углях, отличающихся отражательной способностью витринита, спекаемостью и выходом летучих веществ. Петрографические исследования углей Кузнецкого бассейна показали разнообразие ассоциаций коллинита с теллинитом, теллинита с витродетринитом и витринита с минеральными компонентами в этих углях.

Отмечается большое разнообразие не только в групповом петрографическом составе, но и внутри группы витринита, по которому определяется отражательная способность. Такое разнообразие диктует необходимость идентичных условий измерения отражательной способности и необходимость определения различий отражательной способности основных составляющих витринита с целью более правильной оценки степени метаморфизма исследуемых углей. Наиболее склонны к спеканию угли средней степени метаморфизма, отвечающие маркам Ж, КЖ, К. Основными носителями спекаемости являются коллинит и липтинит. Полным отсутствием спекающихся свойств характеризуются инертинит и теллинит.

По результатам детальных петрографических исследований каменных углей Кузнецкого бассейна различных месторождений, приведенных в настоящей статье, обнаружена вариация свойства различных типов витринита кузнецких углей. Этот факт необходимо учитывать при составлении шихт для коксования с целью получения кокса высокой механической прочности (CSR) и низкой реакционной способности (CRI).

Для цитирования: Клишин В.И., Тайлаков О.В., Уткаев Е.А., Соколов С.В. Особенности контроля гидродинамического воздействия на угольный пласт при поинтервальном разрыве // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 6 (160). С. 77-83. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-77-83, EDN: FPSHLZ

Введение

Метан угольных пластов является как эффективным источником энергии, так и источником повышенной опасности при интенсивной отработке углегазонасного массива, в связи с чем применение мероприятий по дегазации разрабатываемых газоносных пластов является необходимой мерой для безопасного ведения горных работ. Однако в процессе сооружения и эксплуатации дегазационных скважин происходит снижение газоотдачи угленосного массива. При этом пластовая дегазация угольных пластов, не разгруженных от горного давления, из подземных горных выработок существующими методами через скважины из-за низкой природной газопроницаемости угля не всегда эффективна. Для повышения производительности угледобычи используется метод гидроразрыва пластов, который позволяет снизить природную газоносность. Этот процесс включает закачку большого объема воды, песка и химических реагентов под высоким давлением для создания новых трещин и увеличения проницаемости пласта. Тем самым повышаются фильтрационные свойства угленосного массива в прискважинной зоне и газоотдача пласта. В [1-5] обсуждается возможность применения гидроразрыва для стимуляции газоотдачи угольных пластов с учетом их отличия от нефтегазонасных пород. В [6-8] обобщены результаты исследований в направлении разработки и обоснования технологий и оборудования многоинтервального гидроразрыва. На угольных шахтах РФ наиболее распространенным методом повышения газоотдачи угольных пластов является бурение дегазационных скважин из подготовительных выработок с последующим применением продольных, вертикальных или горизонтальных гидроразрывов относительно оси скважин [9].

Метод поинтервального гидроразрыва угольного пласта

Исходя из того, что при воздействии на угольный пласт трещины развиваются в направлении, которое зависит от напряженно-деформированного состояния массива и его трещиноватости, необходимо формирование трещин гидроразрыва, ориентированных поперек скважины (вкrest простираия угольного пласта). Для этого разработан принципиально новый способ поинтервального гидроразрыва дегазационной скважины, который повышает эффективность предварительной дегазации неразгруженных пластов угля до начала очистных работ и текущей дегазации разгружаемых от горного давления угленосных толщ. С механической точки зрения направленный поинтервальный гидроразрыв приводит к образованию дренажных каналов высокой проводимости и протяженности в окрестности скважин за счет раскрытия естественных нарушений при распространении новых трещин.

Технология основана на применении оригинального разрывного устройства – двустороннего пакера, включающего два упругорасширяющихся рукава (пакера), между

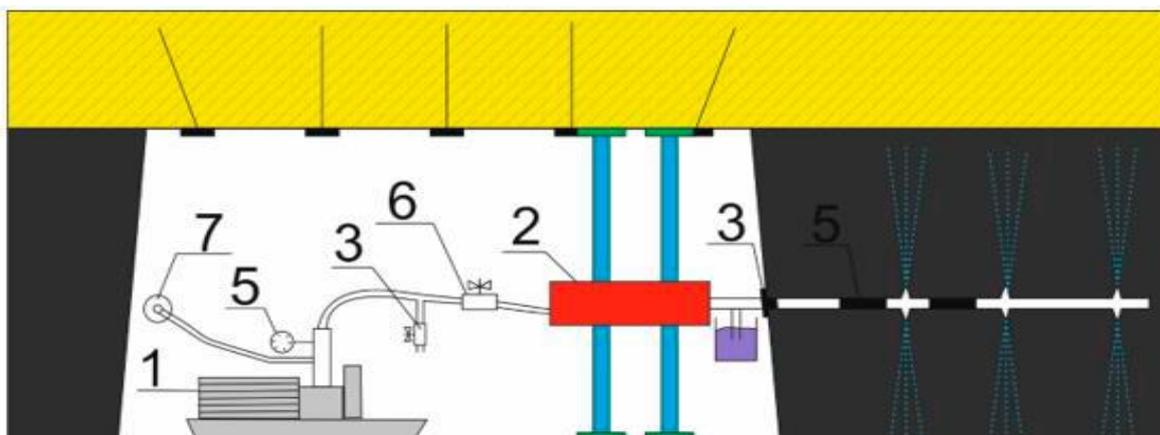


Рис. 1. Технологическая схема ППР: 1 – насос; 2 – буровой станок; 3 – уплотнитель устья; 4 – разрывное устройство; 5 – манометр; 6 – вентиль высоконапорный; 7 – противопожарный трубопровод

Fig. 1. Technological diagram of the interval hydraulic fracturing of a coal seam: 1 – pump; 2 – drilling rig; 3 – wellhead seal; 4 – bursting device; 5 – pressure gauge; 6 – high pressure valve; 7 – fire protection pipeline

которыми установлен межпакерный клапан, регулирующий давление рабочей жидкости в гидросистеме [10]. Он предназначен для изоляции области скважины между упругорасширяющимися рукавами при повышении давления в этой области до величины, достаточной для гидроразрыва. Перемещая разрывное устройство вдоль скважины, можно производить гидроразрывы водой или водными растворами в заданных участках угольного пласта. На Рис. 1 представлена схема поинтервального гидроразрыва угольного пласта из подготовительной выработки через необсаженную скважину.

Распор пакеров сжимает горизонтальные трещины и исключает разрыв пласта по этим трещинам на более удаленное расстояние, где вертикальные трещины пересекают горизонтальные и в них под давлением проникает жидкость, раскрывая существующие трещины. В случае реализации поинтервального гидроразрыва вкрест скважины, пробуренной параллельно очистному забою, при его приближении происходит дальнейшее раскрытие искусственно созданных трещин для выхода оставшегося метана. Вновь образованные вертикальные трещины под действием горного давления не сжимаются, а развиваются (сохраняются). В результате такого гидроразрыва пластакратно повышается проницаемость и дебит скважин за счет снижения гидравлических сопротивлений в призабойной зоне и увеличения ее фильтрационной поверхности. Кроме того, увеличивается газоотдача пласта за счет приобщения к выработке слабо дренируемых зон и пропластков [11]. Для определения площади обнажения поверхности скважины без разрывов угольного массива и с пошаговым разрывом используется отношение

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{\pi L d}{\pi L \left(d + \frac{D^2}{4L}\right)} = \frac{d}{d + \frac{D^2}{4L}}, \quad (1)$$

где S_2 – площадь обнажения поверхности скважины с пошаговым разрывом угольного массива, m^2 ; S_1 – площадь обнажения поверхности скважины без разрывов угольного массива, m^2 ; d – диаметр скважины, m ; L – глубина скважины, m ; D – диаметр распространения трещины, m ; l – расстояние между разрывами, m .

Мониторинг эффективности гидровоздействия на углепородный массив

Для контроля эффективности выполненных работ и параметров гидроразрыва пласта через скважины, пробуренные из горной выработки, предусмотрен комплекс работ, который включает оценку геомеханического состояния угольного пласта до и после гидроразрыва, его коллекторских свойств, а также мониторинг нагнетания флюида в скважину [12, 13]. При этом до поинтервального гидроразрыва выполняется: сейсмическое просвечивание; радиолокационное обследование; определения природной газоносности и коэффициента проницаемости пласта; оценка протяженности скважины. При проведении гидродинамического воздействия на угольный пласт выполняется мониторинг процесса нагнетания флюида в скважину путем измерений изменения давления рабочей жидкости. После выполнения работ по стимуляции угольного пласта для увеличения его газоотдачи выполняются сейсмическое просвечивание и радиолокационное обследование.

При сейсмическом просвечивании изменения геомеханического состояния углепородного массива до и после гидровоздействия оцениваются на основе анализа прохождения в нем сейсмических волн, на скорость распространения которых оказывает наличие геологических формаций с различными физико-механическими свойствами [14]. При сейсмическом просвечивании отдельные группы волн распространяются непосредственно по угольному пласту, другие – по кровле или почве угольного пласта. Кроме того, для обнаружения структурных изменений в углепородном массиве до и после гидровоздействия применяется радиолокационное обследование методом регистрации радиолокационного сигнала с последующей обработкой и интерпретацией полученных данных. Вместе с тем при бурении проводится уточнение газоносности и проницаемости угольного пласта путем отбора и исследования угольных кернов. После бурения и подготовки скважины при гидродинамическом воздействии осуществляется мониторинг процесса нагнетания флюида на основе регистрации изменения в ней давления. Для контроля гидродинамического воздействия и оценки изменений давления в скважине, пробуренной из горной выработки в угольный пласт, используется измерительный комплекс, который включает в себя следующее оборудование: рукава высокого давления; камера высокого давления; глубинный электронный манометр и механический манометр [15]. Для подключения электронного манометра к системе нагнетания

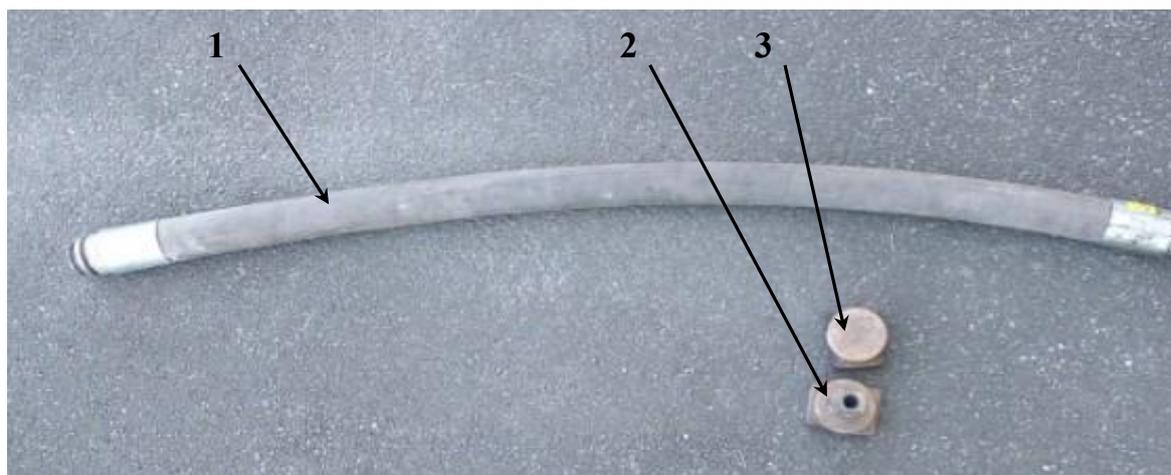


Рис. 2. Колба высокого давления:

1 – рукав высокого давления с металлонавивкой 4SH; 2 – заглушка; 3 – переходник

Fig. 2. High pressure flask:

1 – high pressure hose with metal coil 4SH; 2 – plug; 3 – adapter

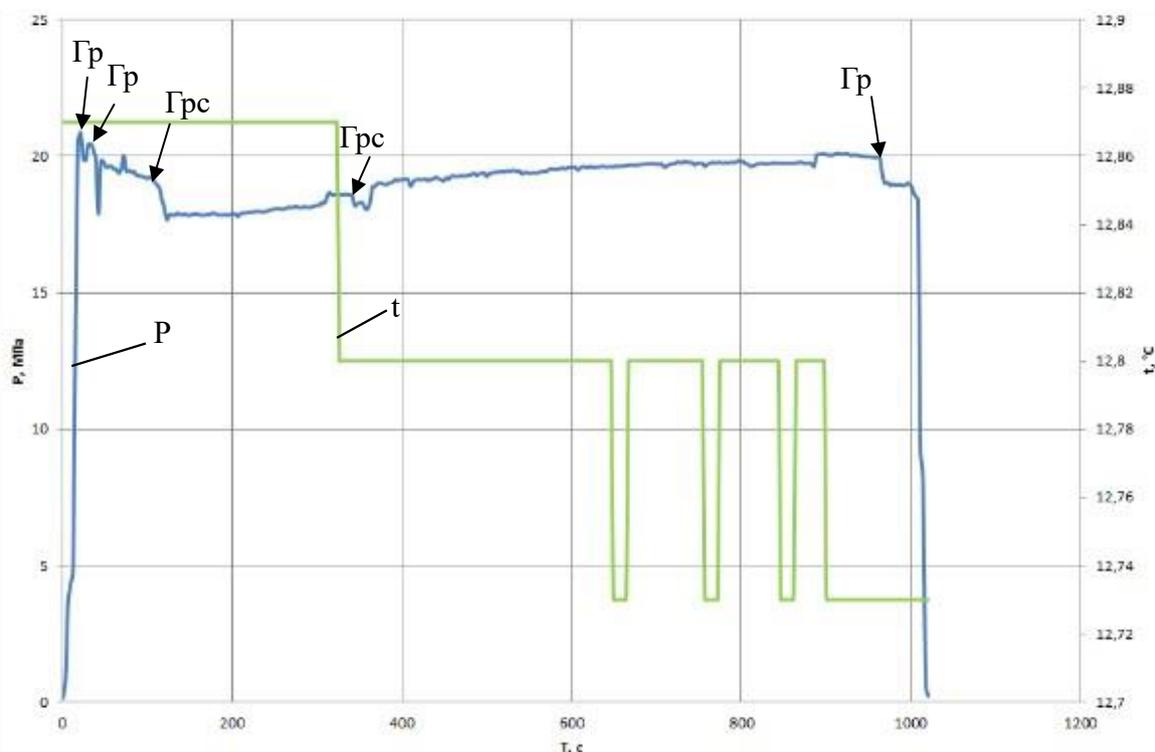


Рис. 3. Изменение давления P и температуры t при проведении гидродинамического воздействия на угольный пласт

Fig. 3. Change in pressure P and temperature t during hydrodynamic impact on a coal seam

рабочей жидкости используется колба высокого давления (Рис. 2), которая состоит из рукава с металлонавивкой (EN 856 4SH), переходника и цельнометаллической заглушки. Рукав колбы состоит из следующих слоев: внутренний слой (маслостойкая синтетическая резина); усиление (четыре слоя стальной проволочной спиральной навивки); наружный слой (синтетическая резина, стойкая к истиранию).

Предварительно запрограммированный электронный автономный манометр размещается в колбе, которая подключается к системе подачи флюида в скважину для регистрации изменений давлений при гидродинамических воздействиях. Манометр представляет собой глубинный электронный манометр, позволяющий измерять давления до 34,45 МПа с погрешностью 0,05 %. После выполнения работ по поинтервальному гидроразрыву манометр извлекается для обработки и интерпретации данных измерений. На Рис. 3 представлен пример кривой

изменения давления при нагнетании флюида в скважину, на которой выделены участки, соответствующие раскрытию естественных трещин (Грс), гидравлическим разрывам пласта и образованию новых трещин (Гр).

Выводы

Применение разработанного метода поинтервального гидроразрыва угольного пласта в пробуренных из горных выработок дегазационных скважинах позволяет снизить количество скважин и повысить объем капируемой метановоздушной смеси. При этом мониторинг гидродинамического воздействия, включающий комплекс работ по определению изменений геомеханического состояния, коллекторских свойств и контролю процесса нагнетания флюида в скважину, обеспечивает оценку эффективности проведенных мероприятий по стимуляции газоотдачи углепородного массива.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р (Соглашение № 075-15-2022-1191).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jun F. [et al.] Directional hydraulic fracturing to control hard-roof rockburst in coal mines // International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. – Volume 22. – Issue 2. – PP. 177–181.
2. Deng J. [et al.] 3D finite element modeling of directional hydraulic fracturing based on deformation reinforcement theory // Computers and Geotechnics. 2018. Vol. 94. PP. 118–133.
3. Курленя М. В. [и др.] Интенсификация подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва // ФТПРПИ. 2017. № 6. С. 2–9.
4. Jeffrey R. [et al.] Experience and results from using hydraulic fracturing in coal mining // Proc. 3rd Int. Workshop on Mine Hazards Prevention and Control, Brisbane, 2013. Pp. 110–116.
5. El Rabaa W. Experimental study of hydraulic fracture geometry initiated from horizontal wells // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers. 1989.
6. Аль-Джубори А. [и др.] Метан угольных пластов: чистая энергия для всего мира // Нефтегазовое обозрение. 2009. Том 21. № 2. С. 4–17.
7. Аль-Мата Б. Индивидуальный подход к проектированию гидроразрыва пласта // Нефтегазовое обозрение. 2008. С. 4–18.
8. Liew M. S. [et al.] A Comprehensive Guide to Different Fracturing Technologies: A Review. Energies. 2020. 13. 3326. <https://doi.org/10.3390/en13133326>
9. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Выпуск 22. М. : ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2012. 250 с.
10. Клишин В. И. [и др.] Разупрочнение угольного пласта в качестве метода интенсификации выделения метана // Уголь. 2010. №4. С. 40–42.
11. Клишин В. И. [и др.] Методы гидроразрыва труднообрушающейся кровли и угольного пласта для исключения динамических явлений в угольных шахтах // Горная промышленность. 2022. №6.
12. Тайлаков О. В. [и др.] Оценка фильтрационных свойств угольных пластов // Газовая промышленность. Спец. выпуск. 2012. № 672. С. 24–25.
13. Соколов, С. В. [и др.] Комплексные геофизические исследования состояния углепородного массива в условиях Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 2. С. 66–70.
14. Гурвич И. И. Сейсморазведка. Справочник геофизика / Под ред. И. И. Гурвича, В. П. Номоконова. М. : Недра, 1981. 464с.
15. Tailakov O. V. Intensification of gas recovery from coal seams applying the method of hydrodynamic impact in horizontal boreholes // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. Vol. 377. P. 012047. Nov. 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012047

© 2023 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Владимир Иванович Клишин, д-р техн. наук, чл.-кор. РАН, проф., Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН,

(г. Кемерово, Российская Федерация), e-mail: klishinvi@ic.sbras.ru

Олег Владимирович Тайлаков, д-р техн. наук, проф., Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, (г. Кемерово, Российская Федерация), АО «НЦ ВостНИИ», (г. Кемерово, Российская Федерация), e-mail: oleg2579@gmail.com

Евгений Александрович Уткаев, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, (г. Кемерово, Российская Федерация), e-mail: utkaev@mail.ru

Сергей Владиславович Соколов, канд. техн. наук, научный сотрудник, Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, (г. Кемерово, Российская Федерация), e-mail: sokolovsviuu@bk.ru

Заявленный вклад авторов:

Клишин Владимир Иванович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент;

Тайлаков Олег Владимирович – концептуализация исследования, научный менеджмент, выводы;

Уткаев Евгений Александрович – обработка и интерпретация результатов научных исследований, написание текста, выводы;

Соколов Сергей Владиславович – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

FEATURES OF CONTROL OF HYDRODYNAMIC IMPACT ON COAL BED DURING INTERVAL FRACTURING

Vladimir I. Klishin¹, Oleg V. Tailakov^{1,2},
Evgeny A. Utkaev¹, Sergey V. Sokolov¹

¹ Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry

² NC VostNII JSC

*for correspondence: klishinvi@ic.sbras.ru



Article info

Received:

29 September 2023

Accepted for publication:

10 December 2023

Accepted:

12 December 2023

Published:

21 December 2023

Keywords: degassing, degassing boreholes, gas recovery, coal seam, interval hydraulic fracturing, double packer, hydraulic impact monitoring, seismic scanning

Abstract.

The article provides a brief overview of the application of hydroelectric action on carbonaceous oil to reduce the natural gas content of the formations being developed.

An increase in the efficiency of degassing coal seams that are not loaded from rock pressure is discussed by stimulating their gas recovery using hydraulic fracturing of the coal seam, which leads to the development of cracks. A new method of inter-interval hydraulic fracturing of a coal seam through degassing wells drilled from a mine is proposed. The method is based on the use of an original bursting device - a double-sided packer, which includes two elastically expanding sleeves (packers), between which an inter-packer valve is installed, designed to regulate the pressure of the working fluid in the hydraulic system. To assess the effectiveness of the intervertebral hydrodynamic impact on the coal seam, a set of methods and means of monitoring it is provided, including seismic transmission of the carboniferous massif before and after hydraulic fracturing; radio-location survey; determination of natural gas content and reservoir permeability coefficient; assessment of the length of the well, as well as monitoring the process of fluid injection into the well by measuring changes in the pressure of the working fluid. As a confirmation of the rationality of the proposed method, the actual pressure curve is presented with the allocation of intervals corresponding to the opening of natural cracks, hydraulic fractures and the formation of new cracks, obtained as part of monitoring the hydrodynamic effects on the mined coal seam of an operating mine.

For citation: Klishin V.I., Tailakov O.V., Utkaev E.A., Sokolov S.V. Features of control of hydrodynamic impact on coal bed during interval fracturing. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023; 6(160):77-83. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-77-83, EDN: FPSHLZ

REFERENCES

1. Jun, F. [et al.] Directional hydraulic fracturing to control hard-roof rockburst in coal mines. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015; 22(2):177–181.
2. Deng J. [et al.] 3D finite element modeling of directional hydraulic fracturing based on deformation reinforcement theory. *Computers and Geotechnics*. 2018; 94:118–133.
3. Kurlenya M.V. [et al.] Stimulation of underground degassing in coal seams by hydraulic fracturing method. *Journal of Mining Science*. 2017; 6:2–9.
4. Jeffrey R. [et al.] Experience and results from using hydraulic fracturing in coal mining. *Proc. 3rd Int. Workshop on Mine Hazards Prevention and Control*. Brisbane. 2013. Pp. 110–116.
5. El Rabaa W. Experimental study of hydraulic fracture geometry initiated from horizontal wells. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers*. 1989.
6. Al'-Dzhubori A. [et al.] Coal Seam Methane: Clean Energy for the World. *Oil and Gas Review*. 2009; 21(2):4–17.
7. Al'-Mata B. [et al.] Individual approach to hydraulic fracturing design. *Oil and Gas Review*. 2008. Pp. 4-18.
8. Liew M. S. [et al.] A Comprehensive Guide to Different Fracturing Technologies: A Review. *Energies*. 2020; 13:3326. <https://doi.org/10.3390/en13133326>
9. Instrukciya po degazacii ugol'nyh shaht. Seriya 05. Vypusk 22. M.: Zakrytoe akcionernoe obshchestvo «Nauchno-tehnicheskij centr issledovaniy problem promyshlennoj bezopasnosti»; 2012.
10. Klishin V.I. [et al.] Rehardening of a coal layer as a method of an intensification of allocation of methane. *Ugol*. 2010; 4:40–42.
11. Klishin V.I. [et al.] Methods of hydraulic fracturing of poorly caving roof and coal seams to eliminate dynamic phenomena in coal mines. *Gornaya promyshlennost'*. 2022; 6.
12. Tailakov O.V. [et al.] Ocenka fil'tracionnyh svoystv ugol'nyh plastov. *Gazovaya promyshlennost'. Special issue*. 2012; 672:24–25.
13. Sokolov S.V. [et al.] Comprehensive geophysical studies of the coal-rock mass state in the conditions of Kuzbass. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Herald of Kuzbass State Technical University*. 2017; 2:66–71.
14. Gurvich I.I. Seismic exploration. *Geophysicist's Handbook / I.I. Gurvicha, V.P. Nomokonova*. M.: Nedra; 1981.
15. Tailakov O.V. [et al.] Intensification of gas recovery from coal seams applying the method of hydrodynamic impact in horizontal boreholes. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019; 377:012047. DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012047

© 2023 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Vladimir I. Klishin, Dr. Sc. in Engineering, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, (Kemerovo, Russian Federation), e-mail: klishinvi@ic.sbras.ru

Oleg V. Tailakov, Dr. Sc. in Engineering, Professor, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, (Kemerovo, Russian Federation), NC VostNII JSC, (Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: oleg2579@gmail.com

Evgeny A. Utkaev, C. Sc. in Engineering, Senior Researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, (Kemerovo, Russian Federation), e-mail: utkaev@mail.ru

Sergey V. Sokolov, C. Sc. in Engineering, Researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, (Kemerovo, Russian Federation), e-mail: sokolovsviuu@bk.ru

Contribution of the authors:

Vladimir I. Klishin – setting a research task, scientific management;

Oleg V. Tailakov – conceptualization of research, scientific management, conclusions;

Evgeny A. Utkaev – processing and interpretation of research results, writing text, conclusions;

Sergey V. Sokolov – review of relevant literature, data collection and analysis.

All authors have read and approved the final manuscript.

