

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.72.31.005

УДК 550.834.05

© Е.А. Уткаев, С.В. Соколов, Е.А. Салтымаков, 2024

Е.А. УТКАЕВ

канд. техн. наук,
старший научный сотрудник
ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово
e-mail: utkaev@mail.ru

С.В. СОКОЛОВ

канд. техн. наук,
старший научный сотрудник
ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово
e-mail: sokolovsvuu@bk.ru

Е.А. САЛТЫМАКОВ

ведущий инженер
ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово
e-mail: easaltymakov@yandex.ru

МОНИТОРИНГ ГИДРОВВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ НА ОСНОВЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

Предложен подход к обеспечению мониторинга эффективности мероприятий, направленных на повышение газоотдачи угольных пластов, который основан на регистрации изменения геомеханического состояния угленосного массива в результате гидроразрыва. При выполнении мероприятий по повышению газоотдачи угольных пластов с помощью сейсмоакустического оборудования регистрируются сейсмические события, обусловленные гидроразрывом пласта. Оценка геомеханического состояния исследуемого угольного пласта до и после гидрораздействия выполняется на основе сейсмического просвечивания. Описан приборно-аналитический комплекс, применяемый для регистрации геофизической информации. Приведена схема размещения регистрирующего оборудования для выполнения сейсмически измерений. Представлен анализ сейморазведочной информации, регистрируемой до, после и во время гидрораздействия в сейсмических измерениях из горных выработок угольной шахты. Рассмотрены возможности и перспективы развития применения сейморазведки для совершенствования гидрораздействия на угленосный массив.

Ключевые слова: ДОБЫЧА УГЛЯ, ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ, ПОИНТЕРВАЛЬНЫЙ ГИДРОРАЗРЫВ, ДЕГАЗАЦИЯ, ГАЗООТДАЧА, СЕЙСМИЧЕСКАЯ РАЗВЕДКА, СЕЙСМИЧЕСКАЯ ВОЛНА.

Безопасность угледобычи напрямую связана с газовым фактором, действующим в границах разрабатываемого месторождения. В соответствии с положениями Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах», при содержании метана

в угольных пластах, превышающем 9 м³ на тонну с.б.м. угля, при добыче угля необходимо проведение комплекса дегазационных мероприятий. В настоящее время в условиях увеличения глубины ведения горных работ средняя метаносность кузбасских угольных шахт превышает это пороговое значение

[1, 2], что предопределяет необходимости применения дегазации.

При этом для увеличения газоотдачи угольных пластов Кузбасса, характеризующихся низкой проницаемостью [3], необходимо проведение дополнительных мероприятий, направленных на повышение фильтрационных свойств угля. В последнее время для стимуляции газоотдачи угольных пластов расширяющееся применение находит поинтервальный гидроразрыв, который заключается в гидровоздействии на угольный пласт путем нагнетания воды в скважины дегазации [4, 6].

Для оценки эффективности мероприятий по стимуляции газоотдачи угольных пластов предложен подход, основанный на использовании комплекса сейсморазведочной информации, регистрируемой до, после и во время гидроразрыва. Принципиальная схема измерений, выполняемых в шахтных условиях, представлена на рис. 1. Для апробации подхода выполнены исследования в пределах выемочного участка действующего угледобывающего предприятия Кузбасса. Шахтные сейсмические данные регистрировались с применением комплекта одноканальных автономных сейсмических регистраторов «Р-1» во взрывобезопасном исполнении [7]. Для генерирования упругих сейсмических волн использовался механический ударный источник колебаний. Сейсмические регистраторы фиксировали информацию в пределах

геофизических пикетов ПК1-ПК17, распределенных в штреке Б с шагом 20 м; возбуждение сейсмического сигнала, с аналогичным шагом, осуществлялось с пикетов ПК-1-ПК+3, расположенных в пределах борта штрека А, примыкающего к исследуемому участку выемочного столба [7–9].

Геофизические исследования, направленные на оценку эффективности мероприятий по стимуляции газоотдачи выполнены в 5 основных этапов:

Оценка геомеханического состояния исследуемого угольного пласта до гидравлического воздействия, при наличии скважины гидроразрыва (ПК2+7 по штреку Б).

Фиксирование сейсмических событий, связанных с разрывом пласта в процессе гидровоздействия из скважины (ПК2+7 по штреку Б).

Оценка геомеханического состояния угольного пласта после гидровоздействия из скважины (ПК2+7 по штреку Б).

Фиксирование сейсмических событий, связанных с разрывом пласта в процессе гидровоздействия (ПК2 по штреку Б).

Оценка геомеханического состояния угольного пласта после гидровоздействию из скважины (ПК2 по штреку Б).

На первом этапе по результатам сейсмического просвечивания угольного пласта, не измененного гидроразрывом и нарушенного проведением скважины гидроразрыва (ПК2+7 по штреку Б), получен горизонтальный

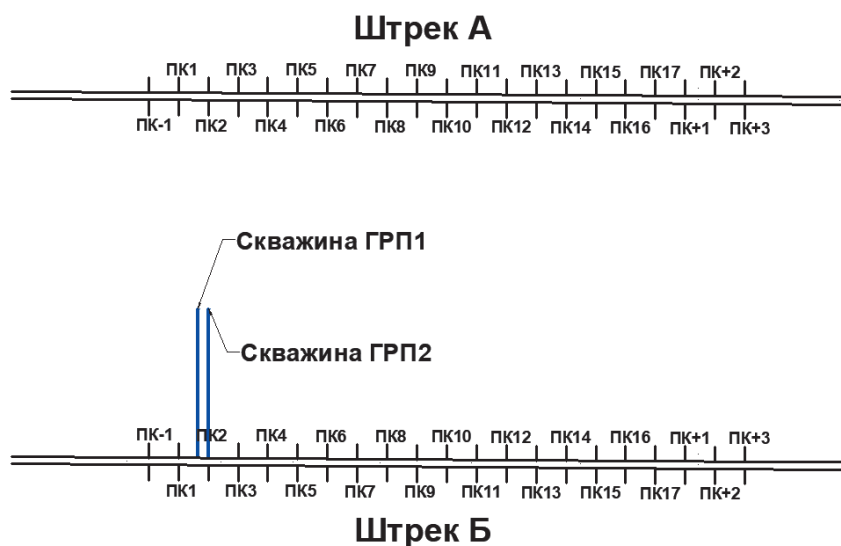


Рис. 1. Принципиальная схема выполнения геофизических исследований

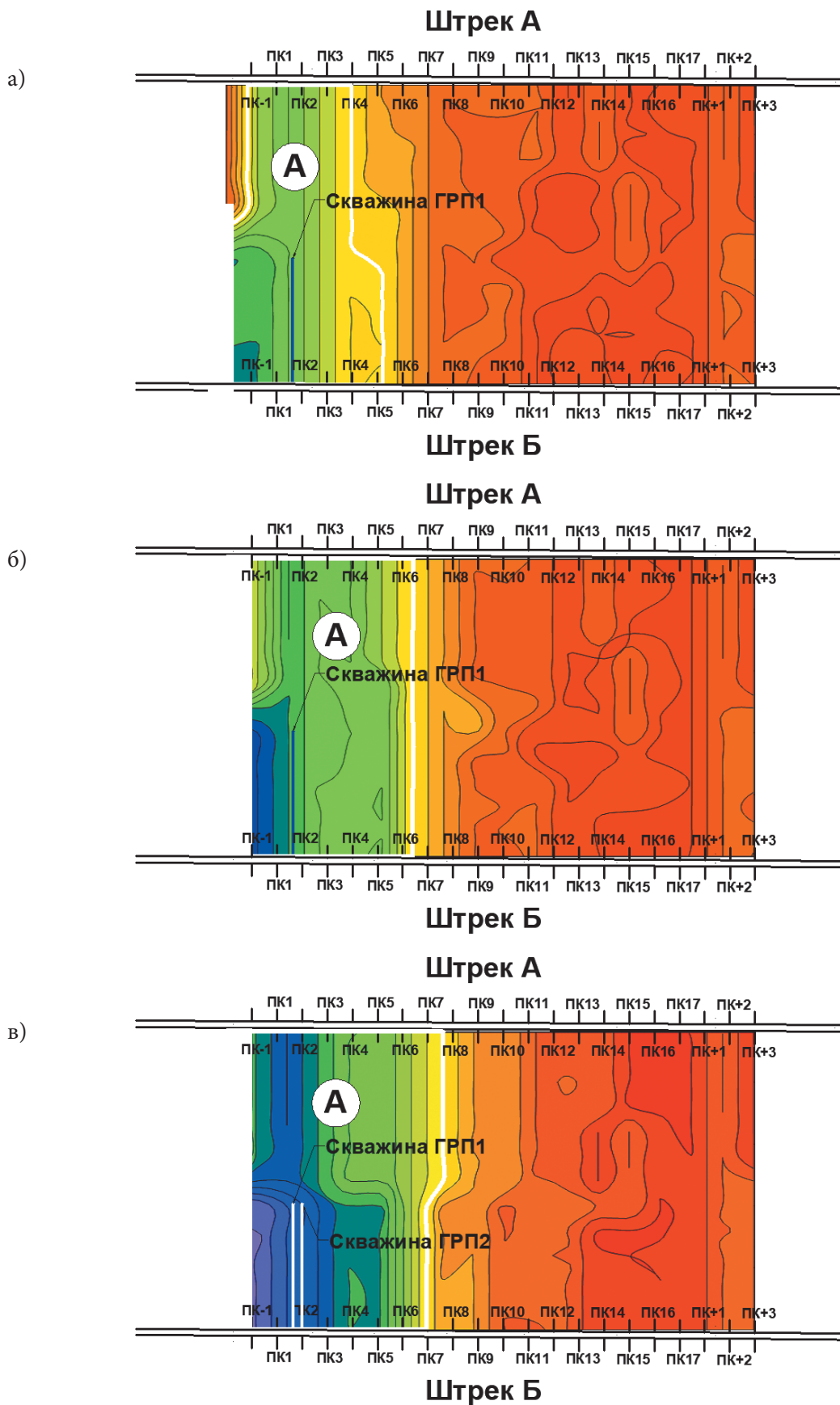


Рис. 2. Результаты сейсмического просвечивания исследуемого участка угольного пласта:
 а — до проведения гидроразрыва; б — после проведения гидроразрыва из скважины (ПК2+7 по штреку Б); в — после проведения гидроразрыва из скважины (ПК2 по штреку Б);

сейсмический разрез (рис. 2а) в пределах которого контрастно выделяется участок снижения скоростей распространения сейсмических волн — А. Причиной выделения характерной зоны А является частичное разупрочнение исследуемого угольного пласта, обусловленное комплексом факторов: влиянием на массив проведенных горных работ, наличием пробуренной скважины гидроразрыва (ПК2⁺⁷), а также естественными геологическими проявлениями.

По результатам сейсмического просвечивания угольного пласта после гидровоздействия из скважины (ПК2⁺⁷ по штреку Б) установлено общее снижение регистрируемого уровня значений скоростей, что проявляется в увеличении площади зоны снижения скоростей распространения сейсмических волн — А (рис. 2б) и является показателем изменения геомеханического состояния исследуемого угольного пласта.

По данным сейсмического просвечивания угольного пласта после проведения скважины гидроразрыва (ПК2 по штреку Б) и гидровоздействия из нее установлено, что средний уровень значений скоростей распространения сейсмических волн снова снизился, а площадь зоны А заметно увеличилась (рис. 2в).

На этапах 2 и 4 исследования выполнен мониторинг процесса гидроразрыва в скважинах ПК2⁺⁷ и ПК2 по штреку Б с регистрацией сейсморазведочными станциями в онлайн режиме сейсмических сигналов (60000 отсчетов).

Полученные сейсмограммы были проанализированы в редакторе сейсмических данных. Гидравлический разрыв в скважинах выполнялся на различных интервалах с шагом 10 м. Для каждого из интервалов выполнен анализ сейсмограмм, соответствующих им по времени регистрации данных. На отдельных участках сейсмограмм были выделены сейсмические события, сопоставленные с вероятными проявлениями разрывов в угольном пласте. В соответствии с временными интервалами регистрации данных событий с результатами дополнительного выполненного мониторинга гидродинамического воздействия на угольный пласт. События, совпавшие по времени с моментами падений давления в скважине, соответствующих раскрытию естественных и образованию искусственных трещин, были охарактеризованы как произошедший гидроразрыв.

Так, при гидровоздействии в интервале № 1 скважины (ПК2⁺⁷ по штреку Б) на 14, 100 и 418 секундах зафиксированы события, характеризующиеся падением давления, которые были сопоставлены с произошедшим разрывом пласта (табл. 1). При этом отмечено, что не для всей последовательности падений давления в скважине зарегистрировано соответствующее сейсмическое событие. Например, на 174, 184, 276 и 394 секундах были зарегистрированы события, выделяющиеся несущественным падением давления, сопоставленные с раскрытием существующих трещин.

Таблица 1

Сопоставление событий, связанных с гидроразрывом пласта для интервала № 1 скважины гидроразрыва ПК2⁺⁷

Событие, сопутствующее гидровоздействию	Действие	Время регистрации события, с						
		14	100	174	184	276	394	418
Мониторинг гидродинамического воздействия		Зафиксировано	Зафиксировано	Зафиксировано	Зафиксировано	Зафиксировано	Зафиксировано	Зафиксировано
Регистрация сейсмических событий		Зафиксировано	Зафиксировано	Не зафиксировано	Не зафиксировано	Не зафиксировано	Не зафиксировано	Зафиксировано
Оценка характера события		Гидроразрыв	Гидроразрыв	Гидрорасчленение	Гидрорасчленение	Гидрорасчленение	Гидрорасчленение	Гидроразрыв

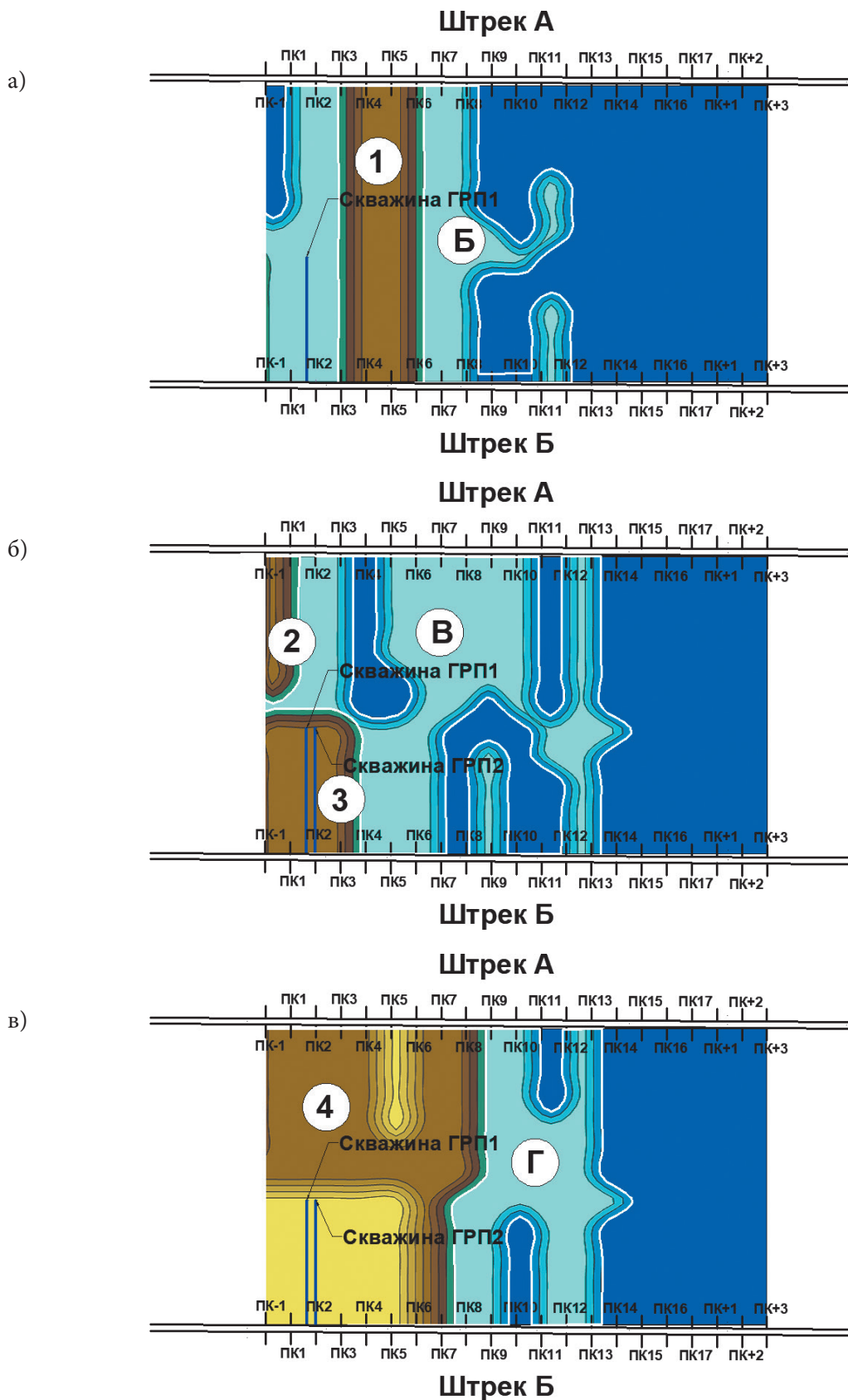


Рис. 3. Горизонтальные геофизические разрезы, построенные на основе коэффициента β_v , определенного:

- а — из разности скоростных характеристик, фиксируемых на первом и втором этапах исследования;
- б — из разности скоростных характеристик, фиксируемых на втором и третьем этапах исследования;
- в — из разности скоростных характеристик, фиксируемых на первом и третьем этапах исследования

Для оценки изменений геомеханического состояния угольного пласта, вызванных гидроразрывом на него из скважин, введен коэффициент:

$$\beta_v = \frac{V_n - V_{n+1}}{V_{\max} - V_{\min}} \times 100, \quad (1)$$

где V_n и V_{n+1} — значения скоростных характеристик, фиксируемых до и после выполнения гидравлического воздействия; V_{\max} и V_{\min} — максимальное и минимальное значения скоростных характеристик.

На рис. 3 представлены геофизические разрезы исследованного интервала угольного пласта, построенные на основе вычисления коэффициента β_v . На первом и втором этапе исследования (рис. 3а) в пределах контрастной зоны Б (интервал пикетов ПК-1-ПК12) зарегистрированы изменения β_v , обусловленные гидроразрывом в скважине (ПК2⁺⁷).

На втором и третьем этапе исследования (рисунок 3б), зарегистрированы изменения β_v в зоне В (интервал пикетов ПК-1-ПК15). Максимальные изменения расчетного значения отмечены в зонах 2 и 3, в площади которых предполагается максимальное разупрочнение угольного пласта, обусловленное гидроразрывом в скважине (ПК2).

На рисунке 3в представлен горизонтальный геофизический разрез, который построен на основе вычислений β_v по результатам измерений, выполненных на первом и третьем этапе исследования. Разрез отражает комплекс всех геомеханических изменений в интервале пикетов ПК-1-ПК15 в результате гидроразрыва из скважин (ПК2⁺⁷ и ПК2). Изменения β_v сосредоточены в пределах контрастной зоны Г, которая сформировалась путем слияния зон Б и В. При этом наиболее значительные изменения β_v , вызванные влиянием на исследуемый угольный пласт гидроразрыва

в скважинах (ПК2⁺⁷ и ПК2), отмечены в пределах характерной зоны 4, сформированной в результате слияния зон 1, 2, 3. Таким образом, в площади зоны 4 прогнозируется максимальное разупрочнение угольного пласта, обусловленное гидроразрывом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим, что разработанный подход к регистрации изменений геомеханического состояния углепородного массива в результате гидроразрыва с использованием методов сейсмической разведки обеспечивает принципиальную возможность оценки эффективности мероприятий, направленных на повышение эффективности дегазации угольных шахт. В развитие этого подхода в дальнейшем планируется обосновать выбор рациональных геометрических параметров размещения измерительного оборудования в горных выработках для обеспечения регистрации координат участков углепородного массива с измененными фильтрационными свойствами при гидроразрыве.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 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. Шубина Е. А., Лукьянов В. Г. Изучение природной газоносности с целью развития добычи метана из угольных пластов в промышленных масштабах // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 1(113). С. 3–12.
2. Золотых С. С. Заблаговременная дегазация угольных пластов как фактор повышения безопасности на шахтах Кузбасса // Горная промышленность. 2019. № 5(147). С. 18–22.

3. Кудинов Е. В. Промысловая добыча метана угольных пластов в Кузбассе как метод снижения угроз экосистеме // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. № 4(23). С. 84.

4. Клишин В. И., Опрук Г. Ю., Тащиенко А. Л. Применение поинтервального гидроразрыва угольного пласта для интенсификации пластовой дегазации // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2016. № 3. С. 33–39.

5. Леконцев Ю. М., Сажин П. В., Темиряева О. А. Дегазация угольного пласта методом поинтервального гидроразрыва и оборудование для его реализации // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2018. Т. 5. № 2. С. 89–92.

6. Liu D., Wang Y., Zhao S. [et al.] Classification of coal structure combinations and their influence on hydraulic fracturing: A case study from the Qinshui Basin, China // Energies. 2020. Vol. 13. No. 17. P. en13174559.

7. Уткаев Е. А., Соколов С. В., Таюрский М. А. Мониторинг направленного гидровоздействия на угленосный массив в условиях действующих шахт // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2023. № 3. С. 23–30.

8. Писаренко М. В., Тайлаков О. В., Соколов С. В., Колмакова А. А. О прогнозировании малоамплитудной нарушенности угольных пластов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 2. С. 356–366.

9. Сальников А. С., Канарейкин Б. А., Долгова С. В. [и др.] Технология и результаты сейсмотомографических исследований на проходящих волнах в угольных шахтах Кузбасса // Технологии сейсморазведки. 2012. № 2. С. 74–88.

10. Рабинович Е. В., Ганчин К. С., Пупышев И. М., Шефель Г. С. Модель сейсмического импульса, возникающего при гидравлическом разрыве пласта // Математические структуры и моделирование. 2014. № 4(32). С. 105–111.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.72.31.005

UDC 550.834.05

© Е.А. Уткаев, С.В. Соколов, Е.А. Салтымаков, 2024

Е.А. УТКАЕВ

Candidate of Engineering Sciences,

Senior Researcher

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo

e-mail: utkaev@mail.ru

S.V. SOKOLOV

Candidate of Engineering Sciences,

Senior Researcher

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo

e-mail: sokolovsviuu@bk.ru

Е.А. САЛТЫМАКОВ

Senior Researcher

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo

e-mail: utkaev@mail.ru

MONITORING HYDRAULIC IMPACT ON A COAL SEAMS BASED ON SEISMIC SURVEY

An approach to monitoring the effectiveness of measures aimed at increasing gas recovery from coal seams, which is based on recording changes in the geomechanical state of the coal-rock massif as a result of hydraulic fracturing is proposed. When implementing measures to increase gas recovery from coal seams, seismic events caused by hydraulic fracturing are recorded using seismoacoustic equipment. The geomechanical state of the coal seam under study is assessed before and after hydraulic stimulation using seismic scanning. The article describes an instrumental and analytical complex used to record geophysical information. A diagram of the arrangement of recording equipment for seismic measurements is provided. An analysis of seismic exploration information recorded before, after and during hydraulic stimulation in seismic measurements from coal mine workings is presented. The possibilities and prospects for developing seismic exploration to improve hydraulic stimulation of the coal-rock massif are considered.

Keywords: COAL MINING, GEOMECHANICAL STATE, INTERVAL HYDRAULIC FRACTURING, DEGASSING, GAS RECOVERY, SEISMIC SURVEY, SEISMIC WAVE.

REFERENCES

1. Shubina E. A., Lukyanov V. G. Study of natural gas content for the purpose of developing coal seam methane production on an industrial scale // Bulletin of the Kuzbass State Technical University [Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2016. No. 1(113). P. 3–12. [In Russ.].
2. Zolotikh S. S. Early degassing of coal seams as a factor in improving safety in Kuzbass mines // Mining Industry [Gornaya promyshlennost]. 2019. No. 5(147). P. 18–22. [In Russ.].
3. Kudinov E. V. Commercial production of coalbed methane in Kuzbass as a method for reducing threats to the ecosystem // Actual problems of oil and gas [Aktualnyye problemy nefti i gaza.]. 2018. No. 4(23). P. 84. [In Russ.].
4. Klishin V. I., Opruk G. Yu., Tatsienko A. L. Application of interval hydraulic fracturing of a coal seam to intensify seam degassing // Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources [Naukoyemkiye tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov]. 2016. No. 3. P. 33–39. [In Russ.].
5. Lekontsev Yu. M., Sazhin P. V., Temiryaeva O. A. Degassing of a coal seam by interval hydraulic fracturing and equipment for its implementation // Fundamental and applied issues of mining sciences [Fundamental'nyye i prikladnyye voprosy gornykh nauk]. 2018. Vol. 5. No. 2. P. 89–92. [In Russ.].
6. Liu D., Wang Y., Zhao S. [et al.] Classification of coal structure combinations and their influence on hydraulic fracturing: A case study from the Qinshui Basin, China // Energies. 2020. Vol. 13. No. 17. P. en13174559.
7. Utkaev E. A., Sokolov S. V., Tayursky M. A. Monitoring of directed hydraulic impact on coal-rock massif in operating mines // Bulletin of the Scientific Center of the Eastern Research Institute for Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti]. 2023. No. 3. P. 23–30. [In Russ.].
8. Pisarenko M. V., Tailakov O. V., Sokolov S. V., Kolmakova A. A. On forecasting low-amplitude disturbance of coal seams // Bulletin of Tula State University. Earth Sciences [Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle]. 2022. No. 2. P. 356–366. [In Russ.].
9. Salnikov A. S., Kanareikin B. A., Dolgova S. V. [et al.] Technology and results of seismic tomographic studies on passing waves in coal mines of Kuzbass // Seismic exploration technologies [Tekhnologii seysmorazvedki]. 2012. No. 2. P. 74–88. [In Russ.].
10. Rabinovich E. V., Ganchin K. S., Pupyshev I. M., Shefel G. S. Model of a seismic pulse arising during hydraulic fracturing of a formation // Mathematical structures and modeling [Matematicheskiye struktury i modelirovaniye]. 2014. No. 4(32). P. 105–111. [In Russ.].