

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.10.37.004

УДК 622.234.573; 550.832.4

© О. В. Тайлаков, Е. А. Уткаев, С. В. Соколов, Е. А. Салтымаков, М. А. Таюрский, 2023

**О. В. ТАЙЛАКОВ**

д-р техн. наук, проф.,  
генеральный директор  
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово  
главный научный сотрудник,  
ИУ ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово  
e-mail: oleg2579@gmail.com

**Е. А. УТКАЕВ**

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

**С. В. СОКОЛОВ**

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

**Е. А. САЛТЫМАКОВ**

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

**М. А. ТАЮРСКИЙ**

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

## КОМПЛЕКСНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ СТИМУЛЯЦИИ ГАЗООТДАЧИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ В ШАХТНЫХ УСЛОВИЯХ

*Предложен и опробован комплексный подход к совместному применению сейсмического просвечивания и гидродинамических исследований для мониторинга процессов стимуляции газоотдачи угольных пластов. Обсуждается порядок выполнения геофизических измерений в шахтных условиях. Установлена зависимость изменения скоростных характеристик распространения упругих сейсмических волн в угольном пласте до и после гидровоздействия через скважины, которая применена для оценки фильтрационных свойств в прискважинных зонах. Показана эффективность комплексного подхода при мониторинге процессов гидродинамического воздействия на угольные пласты. Предложено дополнить проводимые измерения сейсмическим просвечиванием интервалов выемочного столба, вмещающих отдельные скважины для более точного определения областей разупрочнения угольных пластов при гидродинамическом воздействии.*

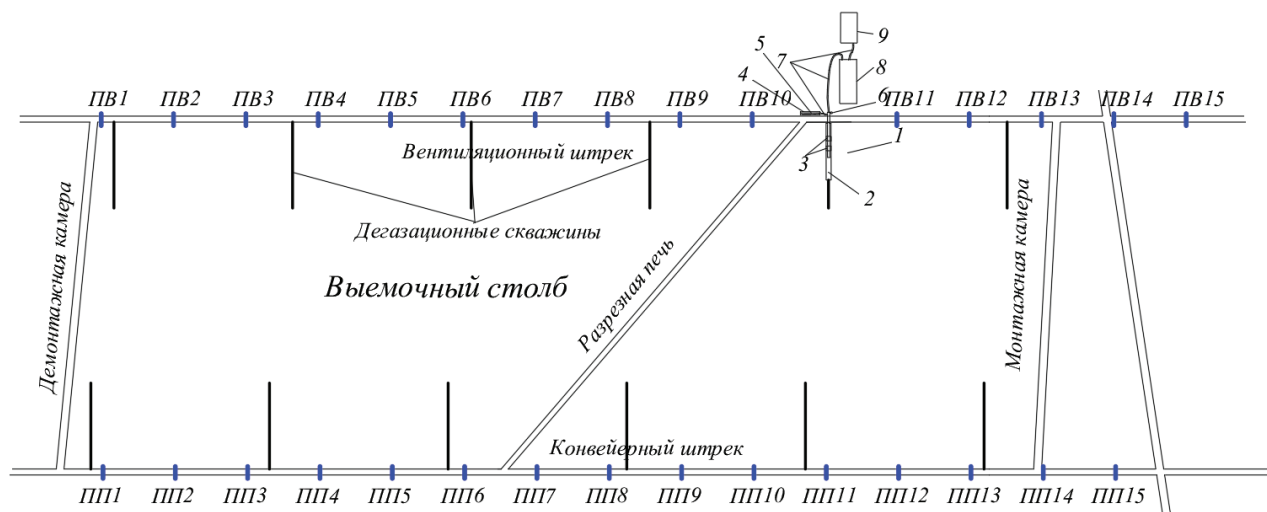
Ключевые слова: УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА, СЕЙСМИЧЕСКОЕ ПРОСВЕЧИВАНИЕ, ГОРНАЯ ВЫРАБОТКА, ФЛЮИД, ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, СКВАЖИНА, ГЕОФОН, ДАВЛЕНИЕ ГИДРОРАЗРЫВА.

При разработке мероприятий, направленных на повышение эффективности дегазации угольных пластов, необходимо учитывать их фильтрационные свойства, увеличение которых способствует интенсификации притоков метана [1–5] в прискважинное пространство дегазационных скважин. В Кузнецком угольном бассейне расширяющееся применение для стимуляции газоотдачи угольных пластов находит метод гидравлического воздействия, основанный на нагнетании в дегазационные скважины флюида с постоянным расходом [6–7]. Одним из направлений совершенствования этого подхода является развитие модельных представлений о процессах фильтрации [8, 9] флюида в трещинно-поровом пространстве угленосного массива с использованием фактических данных, регистрируемых при проведении гидроразрыва в натуральных условиях угольных шахт. Так, в работе [10] представлены результаты физического моделирования процесса гидроразрыва угольного пласта на экспериментальном стенде. Установлено, что учет обратного напряжения, действующего со стороны отфильтрованной в прискважинную область жидкости

разрыва, приводит к существенному повышению достоверности оценки давления открытия трещины. В [11] обсуждаются результаты применения глубинного автономного манометра для контроля параметров гидродинамического воздействия разрабатываемого угольного пласта. В [12] обоснован подход к определению эффективности применения гидроразрыва на основе сейсмического просвечивания угольного пласта.

Поставлена задача обоснования и опробования совместного применения сейсмического просвечивания и гидродинамических исследований для мониторинга процессов стимуляции газоотдачи угольных пластов. Для проведения шахтных измерений было предложено использовать комплекс оборудования, основные элементы которого включают комплект синхронизируемых между собой сейсмостанций и автономный электронный манометр (рис. 1).

Для исследования состояния выемочного столба до и после гидроразрыва пласта методом сейсмического просвечивания сейсморегистраторы размещались в пунктах приема с интервалом 20 м между ними. Координатная привязка измерительных систем к реальным



ПВ — пункт возбуждения сейсмических сигналов; ПП — пункт приема сейсмических сигналов; 1 — угольный пласт; 2 — скважина; 3 — пакер; 4 — колба высокого давления; 5 — электронный манометр; 6 — механический манометр; 7 — рукав высокого давления; 8 — насосная станция; 9 — емкость для воды

Рис. 1. Комплексная схема расстановки оборудования для сейсмического просвечивания и подключения автономного манометра [1–4]

условиям участка выемочного столба выполнены на основе плана горных работ с учетом фактического расположения горных выработок и объектов инфраструктуры угольной шахты в соответствии с разметкой пикетов. Сейсмическое просвечивание заключалось в регистрации проходящих упругих волн, искусственно генерируемых от борта противоположного штрека. Приемная база была сформирована путем линейного поинтервального размещения по борту выработки сейсмоприемников (геофонов), подключенных к автономной регистрирующей сейсмостанции. Общее количество геофонов определяет количество каналов в выполняемом исследовании. Для инициации упругих сейсмических волн в шахтных условиях применялся механический ударный источник колебаний. По завершению сейсмического просвечивания отстраивались скоростные томографические разрезы исследованного участка выемочного столба по угольному пласту, которые использовались для оценивания эффективности гидроразрыва.

Для мониторинга гидродинамического воздействия (рис. 1) на угольный пласт (1) через исследуемые скважины (2), пробуренные из горных выработок, автономный электронный манометр (5) размещался в колбе высокого давления (4), и пакерным устройством

(3) герметизировалась скважина. Затем к ней подключался рукав высокого давления (7), механический манометр (6) и с помощью насосной станции (8) флюид из емкости (9) нагнетался в скважину для гидравлического разрыва пласта. После выполнения мероприятий по стимулированию газоотдачи скважина перекрывалась запорной арматурой, отключался насос и автономный датчик давления.

На основе анализа результатов сейсмических измерений получены горизонтальные геофизические разрезы распределения скоростных характеристик в области угольного пласта (рис. 2). Установлено, что до проведения гидроразрыва скорости распространения сейсмических волн изменяются в диапазоне 0,935–1,045 км/с (рис. 2а). При этом выделены две области снижения скоростных характеристик  $\Gamma$  и  $\Gamma_1$  (до 0,96–0,935 км/с), вероятно, характеризующиеся менее прочным состоянием пласта в границах участка выполнения измерений. Также выделяется локальная зона  $D$  возрастания скоростей распространения сейсмических волн до 1,015–1,045 км/с. В измерениях, выполненных после гидровоздействия через скважины ГРП № 1–№ 3, показано общее изменение геомеханического состояния угольного пласта, выраженное снижением регистрируемого скоростного фона, которое

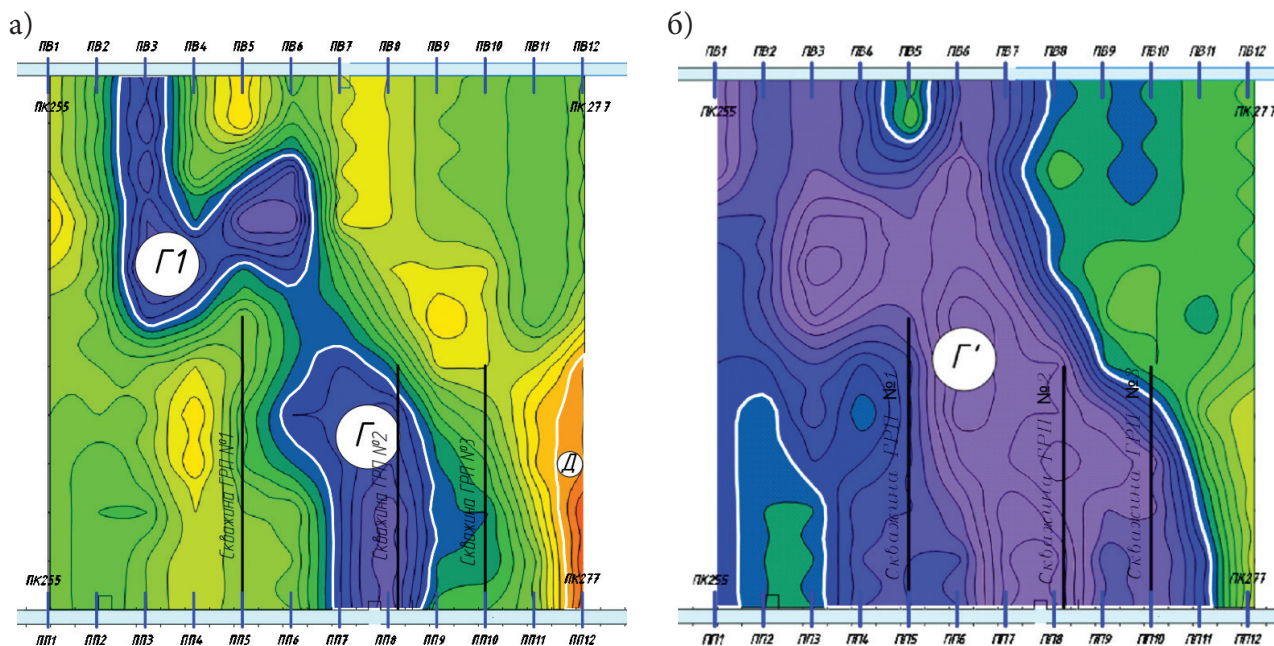


Рис. 2. Результаты сейсмического просвечивания угольного пласта в пределах участка выемочного столба: а) – до гидровоздействия; б) – после гидровоздействия

проявляется, прежде всего, в увеличении общей площади областей снижения скоростных характеристик  $\Gamma$  и  $\Gamma_1$  и формировании из них протяженной зоны  $\Gamma'$  (рис. 2б). При этом отмечено сокращение площади зоны  $D$  с последующим снижением ее скоростных характеристик до фоновых значений.

Мониторинг гидродинамического воздействия выполнен на восьми десятиметровых изолированных интервалах в трех скважинах с использованием автономного манометра. При этом рабочая жидкость под давлением 13,37–34,4 МПа нагнеталась в скважины для гидравлического воздействия на угольный пласт в течение 7,5 часов (рис. 3). На основе анализа результатов выполненных натурных измерений в шахтных условиях показано, что в рассматриваемых горно-геологических условиях минимальное и максимальное давления, при котором происходит гидроразрыв угольного пласта, составляют 13,37 и 34,4 МПа. (табл. 1). При этом коэффициент корреляции между количеством первоначальных естественных трещин и гидроразрывов составляет 0,26, что характеризует слабую взаимосвязь этих параметров. Вместе с тем,

показано, что более существенное влияние на формирование последовательности гидроразрыва оказывают прочностные характеристики угольного пласта. Так, усредненное количество гидроразрывов в скважинах № 1 и 2, расположенных в областях угольного пласта с более высокой крепостью по сравнению с областью, в которую была пробурена скважина № 2, составили 1,13 и 2,13. При этом усредненное количество гидроразрывов в скважине № 2 составило 0,89.

Таким образом, предложенный комплексный подход позволяет оценивать эффективность применения поинтервального гидродинамического воздействия на угольный пласт на основе анализа информации о пространственном изменении прочностных характеристик угольного пласта, которые существенным образом влияют на коллекторские свойства углепородного массива. В последующем предполагается дополнить проводимые измерения сейсмическим просвечиванием интервалов выемочного столба, вмещающих отдельные скважины для более точного определения областей разупрочнения угольных пластов при гидродинамическом воздействии.

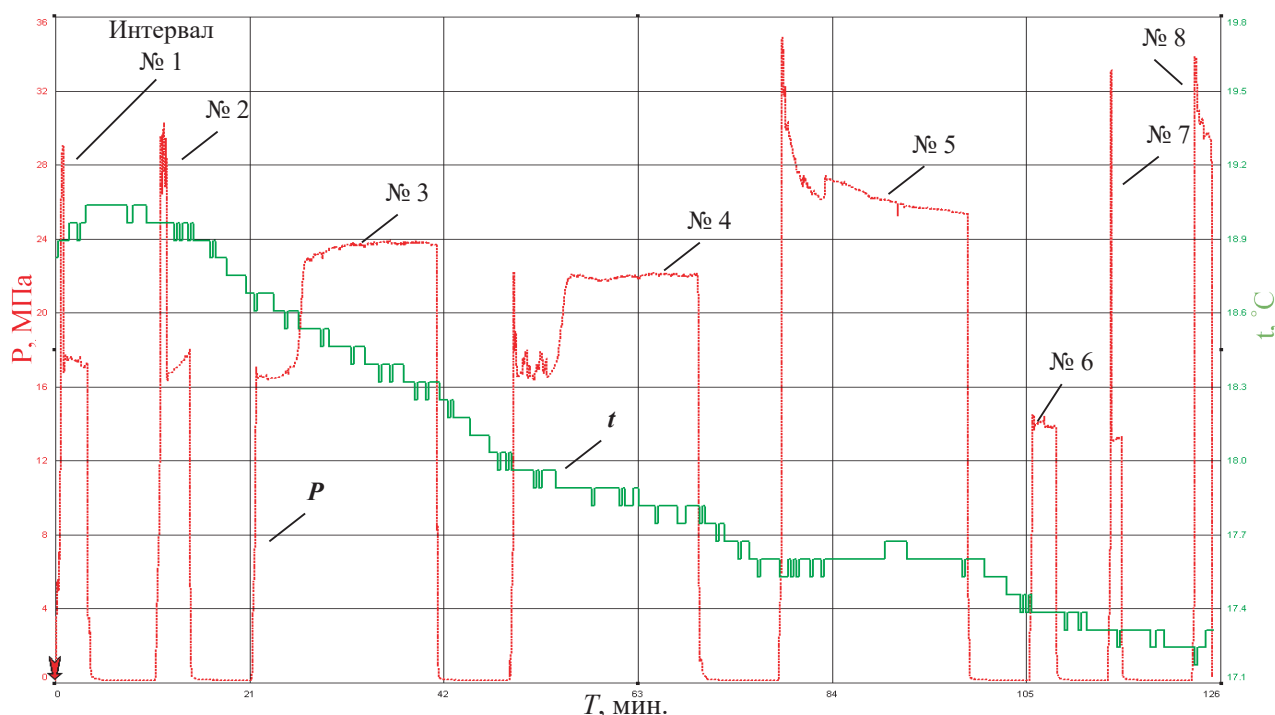


Рис. 3. Изменение давления  $P$  и температуры  $t$  во времени  $T$  при поинтервальном гидродинамическом воздействии на угольный пласт

Таблица 1

Эффективность гидравлического воздействия на угольный пласт

№ скважины	Интервал	Давление гидроразрыва, МПа	Количество раскрытых естественных трещин	Кол-во разрывов
1	1	29,06	1	1
	2	29,64; 29,43	2	2
	3	—	2	
	4	22,24; 17,98; 17,5	3	3
	5	34,4; 31,63	4	2
	6	—	3	-
	7	33,13	0	1
	8	—	1	-
2	1	22,84	5	1
	2	—	5	-
	3	—	2	-
	4	15,47; 14,86	0	2
	5	18,89	0	1
	6	13,37	3	1
	7	—	0	-
	8	—	0	-
	9	13,6; 17,03; 14,61	2	3
3	1	21,5; 21,1; 21,1	2	3
	2	—	5	-
	3	20,0; 21,88	4	2
	4	18,22; 16,36; 16,6; 16,67; 16,06; 17,65; 18,71	5	7
	5	20,88; 19,92	2	2
	6	—	3	-
	7	17,34; 16,01; 15,58	5	3
	8	15,25; 16,96	6	2

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0001 «Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений» (рег. № АААА-А21-121012290020-4).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клишин В. И., Тайлаков О. В., Опрुक Г. Ю. и др. Методы гидроразрыва труднообрушающейся кровли и угольного пласта для исключения динамических явлений в угольных шахтах // Горная промышленность. 2022. № 6. С. 46–53.
2. Клишин В. И., Опрук Г. Ю., Вессель А. О. Геомеханическая оценка метода направленного гидроразрыва пород основной кровли на шахте «Есаульская» сейсмоакустическим экспресс-анализом опасности // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2016. № 3. С. 27–33.
3. Тайлаков О. В., Уткаев Е. А., Смыслов А. И. Мониторинг параметров гидродинамического воздействия на угольный пласт в шахтных условиях // Наука и техника в газовой промышленности. 2018. № 1 (73). С. 88–90.

4. Клишин В. И., Клишин С. В. Исследование взаимодействия пакерных уплотнителей со скважиной при проведении гидроразрыва угольного пласта // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 4. С. 48–58.
5. Плаксин М. С., Р.И. Родин, Рябцев А. А. и др. Гидроразрыв угольного пласта в шахтных условиях как панацея решения газовых проблем шахт (основы разработки и внедрения) // Уголь. 2015. № 2 (1067). С. 48–50.
6. Козырева Е. Н., Шинкевич М. В. Разработка рекомендаций по повышению эффективности управления газовой выделением на выемочных участках // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 5 (117). С. 138–145.
7. Plaksin M. S., Rodin R. I. Improvement of degasification efficiency by pulsed injection of water in coal seam // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources. 2019. P. 012052.
8. Plaksin M. S., Rodin R. I. Framework for innovative determination of natural gas content in coal seams // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources. 2019. P. 012053.
9. Бяков М. А., Ремезов А. В. Анализ исследования фильтрационных и коллекторских свойств угольных пластов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 2 (114). С. 41–47.
10. Новикова Е. В., Тримонова М. А., Турунтаев С. Б. и др. Оценка давления образования трещины в лабораторных экспериментах по гидроразрыву пласта // Динамические процессы в геосферах. 2022. Т. 14. № 2. С. 40–50.
11. Тайлаков О. В., Уткаев Е. А., Кормин А. Н. Контроль параметром гидродинамического воздействия на угольный пласт в горизонтальной скважинах // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2019. № 5. С. 351–353.
12. 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.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.10.37.004

UDC 622.234.573; 550.832.4

© O. V. Tailakov, E. A. Utkaev, S. V. Sokolov, E. A. Saltymakov, M. A. Tayurskiy, 2023

**O. V. TAILAKOV**

Doctor of Engineering Sciences, Professor,

General Director

JSC «NC VostNII», Kemerovo

Chief Researcher

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo

e-mail: oleg2579@gmail.com

**E. A. UTKAEV**

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,  
Researcher  
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo  
e-mail: sokoloviu.s@yandex.ru

**E. A. SALTYSMAKOV**

Lead Engineer,  
Coal Methane Recovery Resources and Technologies Laboratory  
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo  
e-mail: easaltymakov@yandex.ru

**M. A. TAYURSKIY**

Lead engineer  
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo  
e-mail: voutling@mail.ru

**INTEGRATED MONITORING AND MONITORING OF COAL BED GAS RECOVERY STIMULATION PROCESSES IN MINE CONDITIONS**

*A comprehensive approach to the combined use of seismic transmission and hydrodynamic studies to monitor the processes of stimulation of gas recovery of coal seams has been proposed and tested. The procedure for performing coordinate alignment of measuring systems in mine conditions is discussed. The dependence of changes in velocity characteristics of propagation of elastic acoustic waves in the coal formation before and after hydroexposure through wells was established, which was used to assess filtration properties in near-well zones. Shows the effectiveness of the integrated approach in monitoring the processes of hydrodynamic impact on coal seams. It is proposed to supplement measurements with seismic transmission of individual wells for more accurate determination of areas of coal seam softening under hydrodynamic impact.*

Keywords: COAL SEAM, FILTRATION PROPERTIES, SEISMIC TRANSMISSION, MINING, FLUID, HYDRODYNAMIC IMPACT, WELL, GEOPHONE, HYDRAULIC FRACTURING PRESSURE.

**REFERENCES**

1. Klishin V. I., Tailakov O. V., Opruk G. Yu., etc. Methods of hydraulic fracturing of a hard-to-collapse roof and coal seam to eliminate dynamic phenomena in coal mines // Mining industry [Gornaya promyshlennost]. 2022. No. 6. P. 46–53. [In Russ.].
2. Klishin V. I., Opruk G. Yu., Wessel A. O. Geomechanical assessment of the method of directional hydraulic fracturing of rocks of the main roof at the Esaulskaya mine by seismoacoustic express hazard analysis // Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources [Naukoyemkiye tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnykh resursov]. 2016. No. 3. P. 27–33. [In Russ.].
3. Tailakov O. V., Utkaev E. A., Smyslov A. I. Monitoring of parameters of hydrodynamic impact on the coal seam in mine conditions // Science and technology in the gas industry [Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti]. 2018. No. 1 (73). P. 88–90. [In Russ.].
4. Klishin V. I., Klishin S. V. Investigation of the interaction of poker seals with a well during hydraulic fracturing of a coal seam // Physico-technical problems of mining [Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh]. 2020. No. 4. P. 48–58. [In Russ.].

5. Plaksin M. S., Rodin R. I., Ryabtsev A. A. and others Hydraulic fracturing of coal seam in mine conditions as a panacea for solving gas problems of mines (fundamentals of development and implementation) // Coal [Ugol]. 2015. No. 2 (1067). P. 48–50. [In Russ.].
6. Kozyreva E. N., Shinkevich M. V. Development of recommendations for improving the efficiency of gas emission control at excavation sites // Bulletin of the Kuzbass State Technical University [Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2016. No. 5 (117). P. 138–145. [In Russ.].
7. Plaksin M. S., Rodin R. I. Improvement of degasification efficiency by pulsed injection of water in coal seam // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources. 2019. P. 012052.
8. Plaksin M. S., Rodin R. I. Framework for innovative determination of natural gas content in coal seams // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources. 2019. P. 012053.
9. Byakov M. A., Remezov A. V. Analysis of the study of filtration and reservoir properties of coal seams // Bulletin of the Kuzbass State Technical University [Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2016. No. 2 (114). P. 41–47. [In Russ.].
10. Novikova E. V., Trifonova M. A., Turuntaev S. B. and others. Assessment of crack formation pressure in laboratory experiments on hydraulic fracturing // Dynamic processes in geospheres. 2022. Vol. 14. No. 2. P. 40–50. [In Russ.].
11. Tailakov O. V., Utkaev E. A., Kormin A. N. Control of parameters of hydrodynamic impact on the coal seam in horizontal wells // Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources [Naukoyemkiye tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnykh resursov]. 2019. No. 5. P. 351–353. [In Russ.].
12. Utkaev E. A., Sokolov S. V., Tayursky M. A. Monitoring of directional hydroelectric action on a carboniferous massif in operating mines // Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti]. 2023. No. 3. P. 23–30. [In Russ.].