

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.234.573

РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОРАЗРЫВА ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ СКВАЖИН В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ

А. В. Патутин, Л. А. Рыбалкин, А. Н. Дробчик, С. В. Сердюков

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: patutin@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Представлены результаты лабораторных исследований развития трещин гидроразрыва в неоднородном поле напряжений. Трещины создавались в системе двух и трех пересекающихся скважин в искусственных кубических блоках с длиной ребра 420 мм. Формируемый в месте пересечения скважин концентратор напряжений способствует началу процесса трещинообразования в его окрестности. При выполнении экспериментов максимальная сжимающая нагрузка на образец прикладывалась перпендикулярно плоскости, содержащей оси скважин. Установлено, что в таком поле напряжений система из трех скважин лучше стабилизирует трещину в указанной плоскости, чем система из двух скважин.

Физическое моделирование, напряженное состояние, гидроразрыв, трещина, система скважин, давление рабочей жидкости, искусственный блок

DOI: 10.15372/FTPRPI20240106

EDN: BVPQKS

Лабораторные исследования особенностей роста трещин в горных породах наряду с математическим моделированием являются важным этапом разработки технологий гидравлического разрыва пласта. В большинстве случаев при проведении таких экспериментов используют керновый материал, полученный при бурении нефтегазовых скважин. При этом процесс трещинообразования изучается на установках кармановского типа, реализуемых по традиционной условно трехосной схеме с осевым и боковым сжатием, что не полностью соответствует действующему в массиве полю сжимающих напряжений [1 – 4].

Для получения достоверных результатов физического моделирования процесса гидроразрыва необходимы лабораторные установки с независимым трехосным нагружением достаточно крупных кубических блоков [5]. При линейных размерах образца свыше 300 мм в нем можно создавать искусственные неоднородности в виде моделей пластовых скважин и подземных выработок, что расширяет возможности эксперимента и позволяет исследовать особенности

распространения трещин в актуальных для горного дела постановках. Большинство таких работ связано с изучением влияния геометрических параметров указанных неоднородностей и сжимающих нагрузок на траекторию разрыва [6–11]. В некоторых случаях рассматривают и значительное повышение вязкости рабочего флюида [12]. Установленные закономерности представляют ценность для проектирования гидравлического разрыва пласта и его реализации в шахтных условиях, когда распространение трещины происходит в поле сжимающих напряжений, осложненном влиянием близкорасположенных горных выработок и большого числа пластовых скважин.

Опыт практической реализации гидроразрыва показывает, что управлять направлением распространения трещины возможно на начальном этапе ее развития за счет применения различных технических подходов и решений. К ним относятся создание инициирующих щелей на стенках скважины [13–15], изменение локального поля напряжений в зоне разрыва [16, 17], использование специальных рабочих жидкостей и режимов их закачки [18–20]. На направление роста трещины влияют расположение и форма перфорационных отверстий, кривизна скважин, их взаимное расположение, наличие в них ответвлений.

Цель настоящей работы — изучение возможности соединения пересекающихся скважин единой продольной трещиной гидроразрыва в неблагоприятном для ее развития поле напряжений. Физическое моделирование проводилось в крупных кубических блоках из пескобетона с длиной ребра 420 мм, а указанное поле создавалось за счет приложения максимальной нагрузки перпендикулярно плоскости, содержащей оси скважин.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ РОСТА ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА

Исследования процесса гидроразрыва выполнялись на лабораторной установке независимого трехосного нагружения, созданной в лаборатории физических методов воздействия на массив горных пород ИГД СО РАН [21]. Основа установки — станина с четырьмя вертикальными направляющими. Силовой контур испытательной камеры образуется за счет последовательной укладки толстых листов высокоуглеродистой стали с квадратным вырезом и отверстиями под направляющие. Физическая модель помещается на нижнюю опорную площадку станины перед монтированием листов. К преимуществам такого подхода относится достаточно простой доступ к модели после проведения эксперимента без ее излишних перемещений. На рис. 1 приведены фотографии образца в испытательной камере до укладки листов и после.



Рис. 1. Общий вид образца в испытательной камере до укладки стальных листов (а) и после (б)

Схема лабораторной установки и система регистрации данных показана на рис. 2. Сжатие модели по горизонтальным осям осуществляется за счет действия двух плоских гидравлических домкратов 7, 8 с максимально развиваемым усилием 200 тс, опирающихся на стенки испытательной камеры. Нагрузка физической модели 10 по вертикальной оси обеспечивается гидравлическим домкратом 9 поршневого типа с максимальным усилием 400 тс. Раздельная подача давления на каждый домкрат выполняется ручным насосом 3 по гидравлическим линиям 1 через коллектор 4 посредством последовательного перекрытия кранов 5. Подключенные к домкратам пневматические гидроаккумуляторы 6 позволяют стабилизировать внешние сжимающие напряжения при деформировании и разрыве исследуемого образца. Нагнетание рабочей жидкости в модель скважины 11 происходит с помощью механического пресс-расходомера 14.

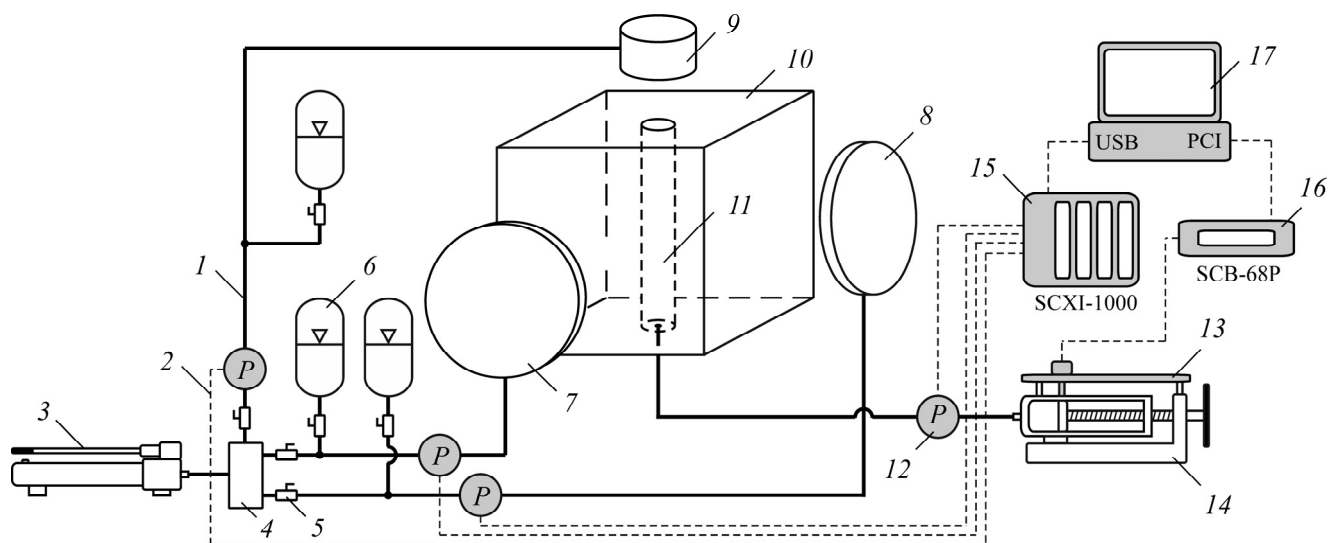


Рис. 2. Схема лабораторной установки с системой регистрации данных: 1 — гидравлическая линия; 2 — линия передачи данных; 3 — ручной насос НРГ-7035; 4 — коллектор; 5 — кран; 6 — гидроаккумулятор пневматический; 7, 8 — плоские гидравлические домкраты; 9 — гидравлический домкрат низкий ДН400П15; 10 — физическая модель; 11 — модель скважины гидроразрыва; 12 — датчик давления РПД-И; 13 — цифровая линейка; 14 — пресс-расходомер механический; 15 — шасси SCXI-1000; 16 — клеммная коробка SCB-68P; 17 — компьютер

В ходе экспериментов с помощью четырех датчиков 12 регистрировались давления в системе независимого трехосного нагружения физической модели и давление рабочей жидкости в интервале гидроразрыва. По линии передачи данных 2 их сигналы поступали в четырехканальный модуль усилителей SCXI-1121, оснащенный терминальным блоком SCXI-1338, и далее оцифровывались преобразователем SCX-1600, установленным в шасси SCXI-1000 15, а затем с его выхода по соединительному кабелю USB — в персональный компьютер 17. Для регистрации объема закачиваемой рабочей жидкости использовалась цифровая линейка (линейный энкодер) 13, выходной сигнал которой поступал в компьютер через клеммную коробку 16 в счетчик импульсов с квадратурным детектором, плата которого подключена к компьютеру 17 через шину PCI. Аппаратные возможности системы сбора данных подробно описаны в [22].

Для изготовления искусственных кубических образцов применялся пескобетон марки М300 в заводской упаковке (кварцевый песок с портландцементом в пропорции 2 : 1). Согласно исследованиям, выполненным на оборудовании ЦКП геомеханических, геофизических и геодинамических измерений СО РАН, предел прочности на сжатие отвердевшей смеси со-

ставляет 21.5 МПа, модуль упругости — 10.5 ГПа. Такие физические свойства искусственного материала сопоставимы с некоторыми породами кровли угольных пластов (алевролиты, углистые аргиллиты), а также с породами соляных месторождений (каменная соль, сильвинит) [23, 24].

Состав заливали в специальные формы, которые обеспечивали параллельность граней, и выдерживали 21 день до полного отвердевания. Всего изготовлено четыре кубических модели размером $420 \times 420 \times 420$ мм, в каждой из которых безударным способом пробуривались две пары скважин: вертикальная длиной 350 мм и пересекающая ее под углом $\gamma = 30^\circ$ наклонная длиной 410 мм. Расстояние l между вертикальными скважинами в блоке составляло 125 мм, а расстояние d между вертикальной и наклонной — 120 мм.

В двух блоках дополнительно создавали наклонные скважины, пересекающиеся с вертикальными под углом $\gamma = 60^\circ$ (рис. 3). Данные скважины пробуривались с боковой поверхности блока, расстояние m от верхней грани блока до центра скважины равнялось 90 мм. Диаметр скважин 16 мм; после бурения выполняли их очистку сжатым воздухом. Формирование в каждом блоке двух независимых систем скважин (отмечены I и II на рис. 3а) позволило увеличить количество проводимых испытаний.

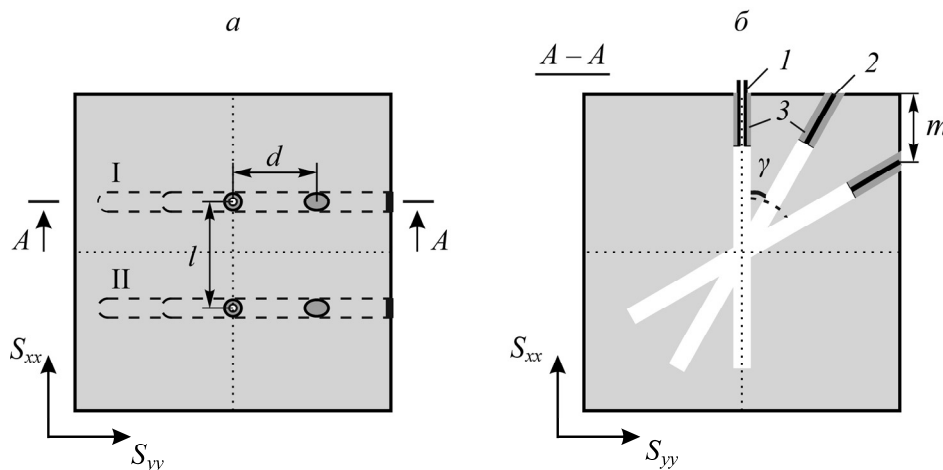


Рис. 3. Общий вид модели блока в варианте с дополнительными наклонными скважинами сверху (а) и в разрезе $A-A$ (б): 1 — штуцер; 2 — шпилька с резиновой шайбой; 3 — эпоксидная смола

В вертикальные скважины устанавливали металлические штуцеры длиной 70 мм и диаметром 12 мм для закачки рабочей жидкости (гидравлическое масло МГЕ-46В), в наклонные — шпильки той же длины с резиновым уплотнением для герметизации области нагружения. Штуцеры и шпильки закреплялись в скважинах с помощью эпоксидной смолы.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В ходе физического моделирования исследовалась возможность управления развитием трещины гидроразрыва в неоднородном поле напряжений с помощью пересекающихся скважин. В качестве максимального сжимающего напряжения выбрано $S_{xx} > S_{yy} = S_{zz}$ (рис. 3). При таком соотношении напряжений на внешних границах модели растущая трещина имеет тенденцию к развороту и выходу из плоскости пересечения скважин, что ранее наблюдалось в ходе численных и лабораторных экспериментов [25, 26]. Часть гидроразрывов проведена в условиях гидростатического сжатия $S_{xx} = S_{yy} = S_{zz}$.

После установки блока в испытательную камеру и его нагружения гидравлическими домкратами выполняли поочередную закачку рабочей жидкости в скважины. В таблице приведены сжимающие напряжения, угол γ пересечения скважин, а также давления гидроразрыва при нагнетании рабочей жидкости в I и II системы скважин (P_{bI} и P_{bII} соответственно).

Характеристики блоков, параметры эксперимента и давления гидроразрыва

Номер блока	Угол γ , град	Условия нагружения, МПа			Давление гидроразрыва, МПа	
		S_{xx}	S_{yy}	S_{zz}	P_{bI}	P_{bII}
1	30	3.0	3	3	7.65	9.76
2	30	4.5	3	3	7.39	5.36
3	60	3.0	3	3	9.23	10.13
4	60	4.5	3	3	12.04	8.40

Изменение давления рабочей жидкости P в первой системе скважин в блоках 1 и 2 от времени закачки t показано на рис. 4. Закачку проводили следующим способом. Сначала жидкость нагнетали ручным насосом, доводя давление в интервале разрыва до 2–3 МПа, а дальнейшую ее подачу осуществляли с помощью механического пресс-расходомера с расходом ~ 60 мл/мин. После образования трещины закачку прекращали, регистрируя падение давления за счет выхода трещины на поверхность блока.

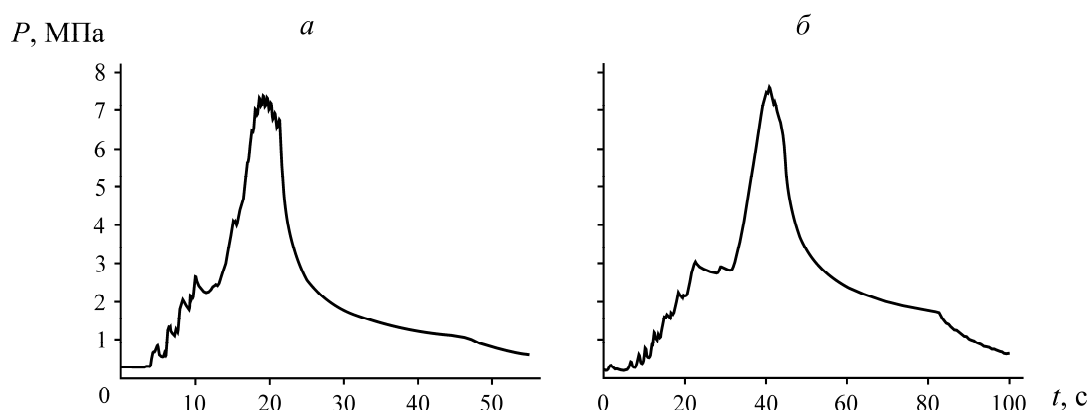


Рис. 4. Изменение давления рабочей жидкости P в скважинах в первом (а) и втором (б) блоках

После выполнения эксперимента блок распиливали по двум параллельным плоскостям циркулярной пилой с глубиной резания 120 мм, затем раскалывали с помощью металлических клиньев. Плоскости распила находились на расстоянии 120 мм от верхней и нижней границ блока.

На рис. 5 представлены фотографии поверхностей разлома физических моделей со следами сформированных трещин, подкрашенных маркером, при этом в верхней части блока располагается первая система скважин (I), а в нижней — вторая (II). Дополнительно измерялся и анализировался угол отклонения α крыльев трещин от плоскости, задаваемой скважинами. В однородном поле напряжений трещины формировались преимущественно в плоскости пересечения скважин (рис. 5а, в). При проведении первой закачки в блоке 1 образовалась трещина, соединяющая скважины и выходящая на боковые стенки модели, отклонение от плоскости скважин составило около 15° . Вертикальная трещина в верхней части (рис. 5а) образовалась при распиле и расколе блока и к гидроразрыву отношения не имеет. Отметим формирование

дополнительной трещины из вертикальной скважины, которая распространилась в нижнюю часть блока. При выполнении второго разрыва наблюдалась сбойка скважин единой продольной трещиной, однако в этом случае искривление ее крыльев более выражено ($\alpha = 48$ и 25°).

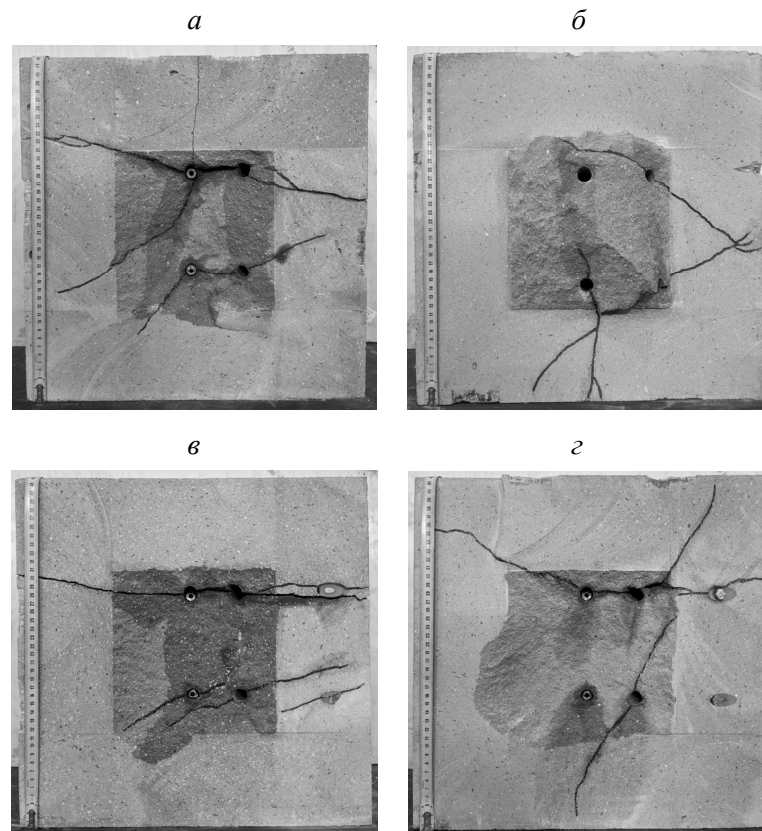


Рис. 5. Траектории трещин гидроразрыва в блоках 1 – 4 (а – г) в плоскости распила, отстоящей на 120 мм от верхней границы блоков

В блоке 3 в ходе первой закачки сформировалась продольная трещина гидроразрыва в направлении действия S_{yy} , объединившая все три скважины, угол α не превышал 8° (рис. 5в). Давление разрыва при закачке рабочей жидкости во вторую скважину составило свыше 10 МПа, при этом трещины, образовавшиеся в каждой из трех скважин, так и не соединились в единый разрыв, отклонившись от общей плоскости на $17 - 28^\circ$.

При $S_{xx} = 1.5S_{yy}$ наблюдались следующие особенности. В блоке 2 первая закачка привела к разрыву наклонной скважины, при этом трещина значительно отклонилась от плоскости, заданной скважинами ($\alpha = 37^\circ$), и вышла на боковую поверхность блока. В ходе второй закачки соединение скважин все-таки произошло, но за пределами плоскости, соединяющей их оси. Виден рост трещины вдоль действия максимального сжимающего напряжения S_{xx} .

В блоке 4 в процессе закачки в первую систему скважин, несмотря на неблагоприятное поле напряжений, сформировался продольный разрыв, объединивший скважины (рис. 5г). Наблюдалось некоторое искривление крыльев трещин по направлению действия S_{xx} . Зафиксировано максимальное давление разрыва, составившее 12 МПа. Второй разрыв в данном блоке привел к возникновению трещины в наклонной скважине при давлении 8.4 МПа, направленной в сторону действия S_{xx} . Формирование трещин в наклонной скважине в неоднородном поле напряжений зафиксировано и при проведении испытаний в блоках меньшего размера [26].

ВЫВОДЫ

Использование системы пересекающихся скважин — перспективный способ локального управления траекторией трещины и создания единого протяженного разрыва. В однородном поле напряжений в большинстве выполненных экспериментов скважины соединялись между собой единой трещиной гидравлического разрыва пласта с небольшими отклонениями от заданной скважинами плоскости.

В условиях достаточно сильного превышения одной горизонтальной нагрузки над другой ($S_{xx} = 1.5S_{yy}$) система из трех скважин лучше стабилизирует трещину в плоскости, содержащей их оси, чем система из двух скважин. Отметим, что в неоднородном поле напряжений высока вероятность формирования трещины в наклонной скважине по направлению действия максимального сжатия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chong Z., Yao Q., and Li X. Experimental investigation of fracture propagation behavior induced by hydraulic fracturing in anisotropic shale cores, *Energies*, 2019, Vol. 12. — 976.
2. Zhou J., Wu G. A., Geng Y. N., Guo Y. T., Chang X., Peng C. Y., and Ai C. Z. Laboratory study of the factors affecting hydraulic fracturing effect for inter-salt oil shale layers, Qianjiang Depression, China, *Pet. Sci.*, 2023, Vol. 23, No. 3 — P 1690–1706.
3. Patel S. M., Sondergeld C. H., and Rai C. S. Laboratory studies of hydraulic fracturing by cyclic injection, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2017, Vol. 95. — P. 8–15.
4. Zhang Y., Long A., Zhao Y., Wang C., Wu S., and Huang H. Impacts of wellbore orientation with respect to bedding inclination and injection rate on laboratory hydraulic fracturing characteristics of Lushan shale, *Fuel*, 2023, Vol. 353. — 129220.
5. Deb P., Düber S., Carducci C. G. C., Clauser C. Laboratory-scale hydraulic fracturing dataset for benchmarking of enhanced geothermal system simulation tools, *Sci. Data*, 2020, Vol. 7. — 220.
6. Liu J., Liu C., and Yao Q. Mechanisms of crack initiation and propagation in dense linear multihole directional hydraulic fracturing, *Shock Vib.*, 2019, Vol. 2019. — 7953813.
7. Ito T., Igarashi A., Suzuki K., Nagakubo S., Matsuzawa M., and Yamamoto K. Laboratory study of hydraulic fracturing behavior in unconsolidated sands for methane hydrate production, *Offshore Technol. Conf.*, 2008, OTC-19324-MS.
8. Zhou J., Jin Y., and Chen M. Experimental investigation of hydraulic fracturing in random naturally fractured blocks, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, 2010, Vol. 47, No. 7. — P. 1193–1199.
9. Сердюков С. В., Азаров А. В., Рыбалкин Л. А., Патутин А. В. О форме трещин гидроразрыва породного массива в окрестности цилиндрической полости // ФТПРПИ. — 2021. — № 6. — С. 72–84.
10. Hu L., Ghassemi A., Pritchett J., and Garg S. Characterization of laboratory-scale hydraulic fracturing for EGS, *Geothermics*, 2020, Vol. 83. — 101706.
11. Guo Z., Tian S., Liu Q., Ma L., Yong Y., and Yang R. Experimental investigation on the breakdown pressure and fracture propagation of radial borehole fracturing, *J. Pet. Sci. Eng.*, 2022, Vol. 208. — 109169.
12. Кю Н. Г. Создание сопряженных ориентированных трещин флюидоразрывом породного массива с использованием скважин в качестве направляющих его фронта // ФТПРПИ. — 2020. — № 5. — С. 115–124.

13. **Леконцев Ю. М., Сажин П. В.** Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 137–142.
14. **Zhai W., He F., Li L., Song J., Xu X., Lv K., Li X., Wang D., and Zhang J.** Roof cutting mechanism and surrounding rock control of small pillar along-gob roadway driving in super high coal seam, Bull. Eng. Geol. Environ., 2023, Vol. 82, No. 4. — 151.
15. **Sun Y., Fu Y., and Wang T.** Field application of directional hydraulic fracturing technology for controlling thick hard roof: a case study, Arabian J. Geosci., 2021, Vol. 14, No. 6. — 438.
16. **Pavlov V. A., Serdyukov S. V., Martynyuk P. A., and Patutin A. V.** Optimisation of borehole-jack fracturing technique for in situ stress measurement, Int. J. Geotech. Eng., 2019, Vol. 13, No. 5. — P. 451–457.
17. **Карев В. И., Коваленко Ю. Ф., Устинов К. Б.** Моделирование геомеханических процессов в окрестности нефтяных и газовых скважин. — М.: ИПМех РАН, 2018. — 472 с.
18. **Kalam S., Afagwu C., Al Jaber J., Siddig O. M., Tariq Z., Mahmoud M., and Abdulraheem A.** A review on non-aqueous fracturing techniques in unconventional reservoirs, J. Nat. Gas Sci. Eng., 2021, Vol. 95. — 104223.
19. **Huang Z., Zhang S., Yang R., Wu X., Li R., Zhang H., and Hung P.** A review of liquid nitrogen fracturing technology, Fuel, 2020, Vol. 266. — 117040.
20. **Song M., Li Q., Hu Q., Wu Y., Ni G., Xu Y., Zhang Y., Hu L., Shi J., Liu J., and Deng Y.** Resistivity response of coal under hydraulic fracturing with different injection rates: A laboratory study, Int. J. Min. Sci. Technol., 2022, Vol. 32, No. 4. — P. 807–819.
21. **Сердюков С. В., Рыбалкин Л. А., Дробчик А. В., Патутин А. В., Шилова Т. В.** Лабораторный стенд для моделирования гидравлического разрыва массива трещиноватых пород // ФТПРПИ. — 2020. — № 6. — С. 193–201.
22. **Сердюков С. В.** Измерительная аппаратура для лабораторных исследований гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2022. — № 6. — С. 187–198.
23. **Торро В. О., Ремезов А. В., Тациенко В. П., Кузнецов Е. В.** Разупрочнение кровли на мощных пологих пластах угля путем применения технологии их отработки слоями по почве // Изв. ТГУ. Науки о Земле. — 2020. — № 3. — С. 201–209.
24. **Барях А. А., Андрейко С. С., Федосеев А. К.** Газодинамическое обрушение кровли при разработке месторождений калийных солей // Зап. Горн. ин-та. — 2020. — Т. 246. — С. 601–609.
25. **Азаров А. В., Патутин А. В., Сердюков С. В.** О форме трещин гидроразрыва в окрестности сопряжения скважины с боковым стволом // ФТПРПИ. — 2022. — № 5. — С. 49–62.
26. **Патутин А. В., Скулкин А. А., Прасолова В. С.** Физическое моделирование гидроразрыва скважины с боковым стволом в искусственных блоках // ФТПРПИ. — 2023. — № 2. — С. 12–20.

Поступила в редакцию 08/I 2024

После доработки 19/I 2024

Принята к публикации 24/I 2024