

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

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 22-27-20061, <https://rscf.ru/project/22-27-20061/>.

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.

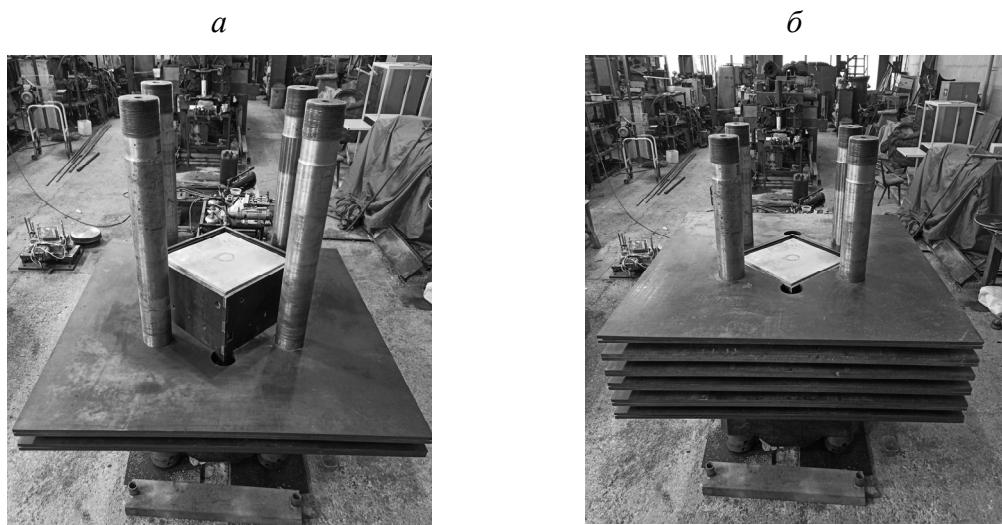


Рис. 1. Общий вид образца в испытательной камере до укладки стальных листов (а) и после (б)

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 развивающим 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.

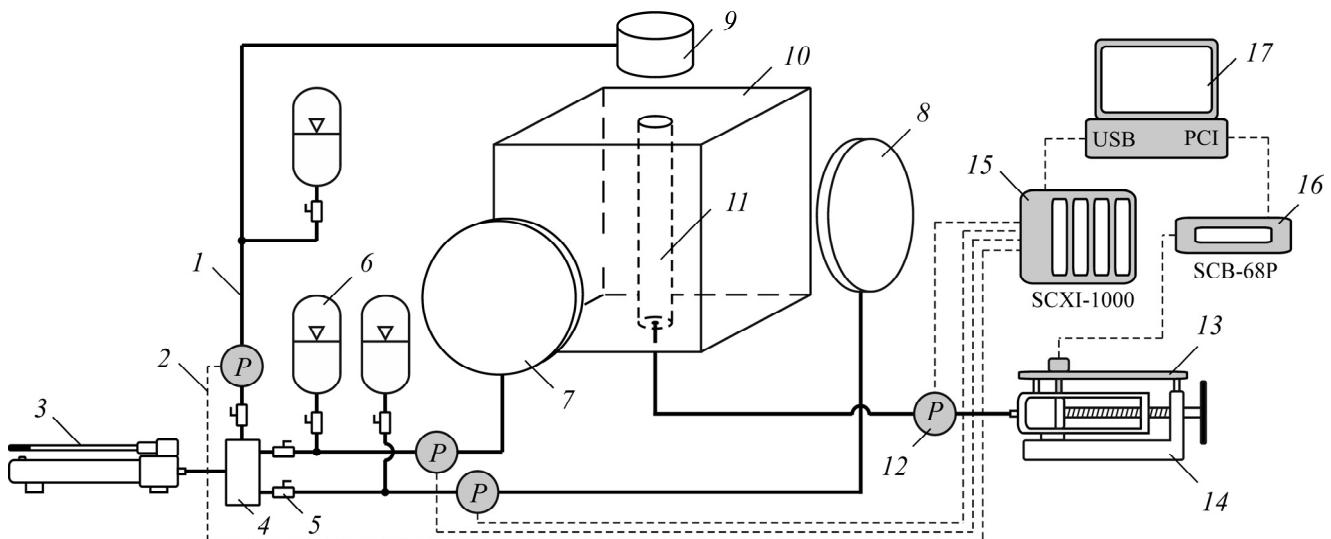


Рис. 2. Схема лабораторной установки с системой регистрации данных: 1 — гидравлическая линия; 2 — линия передачи данных; 3 — ручной насос НРГ-7035; 4 — коллектор; 5 — кран; 6 — гидроаккумулятор пневматический; 7, 8 — плоские гидравлические домкраты; 9 — гидравлический домкрат низкий ДН400П15; 10 — физическая 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.

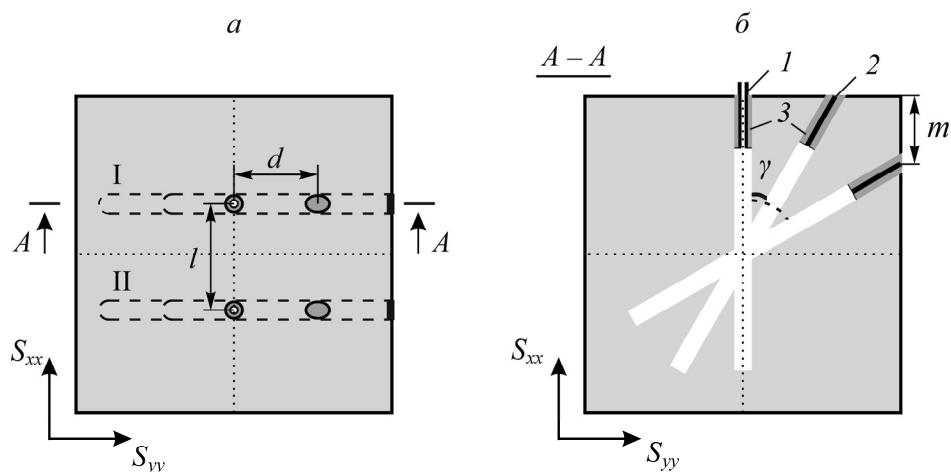


Рис. 3. Общий вид модели блока в варианте с дополнительными наклонными скважинами сверху (а) и в разрезе $A-A$ (б): 1 — штуцер; 2 — шпилька с резиновой шайбой; 3 — эпоксидная смола

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.

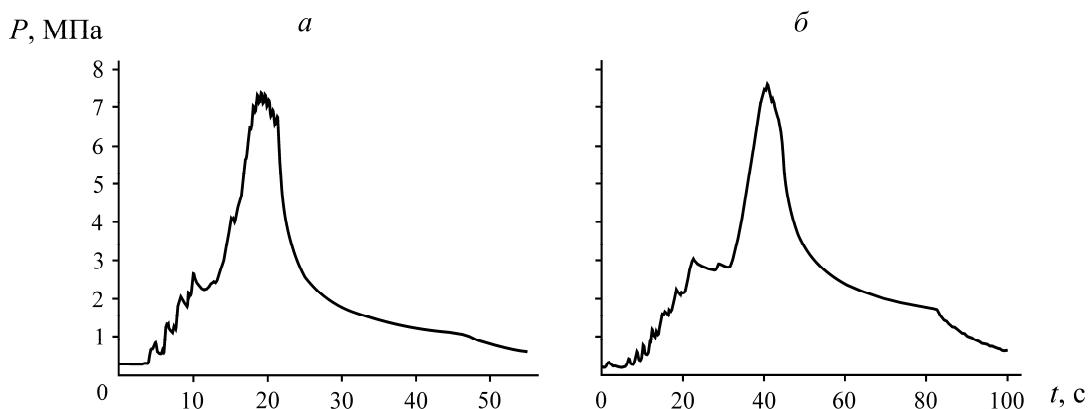


Рис. 4. Изменение давления рабочей жидкости P в скважинах в первом (а) и втором (б) блоках

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 распространялась 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°).

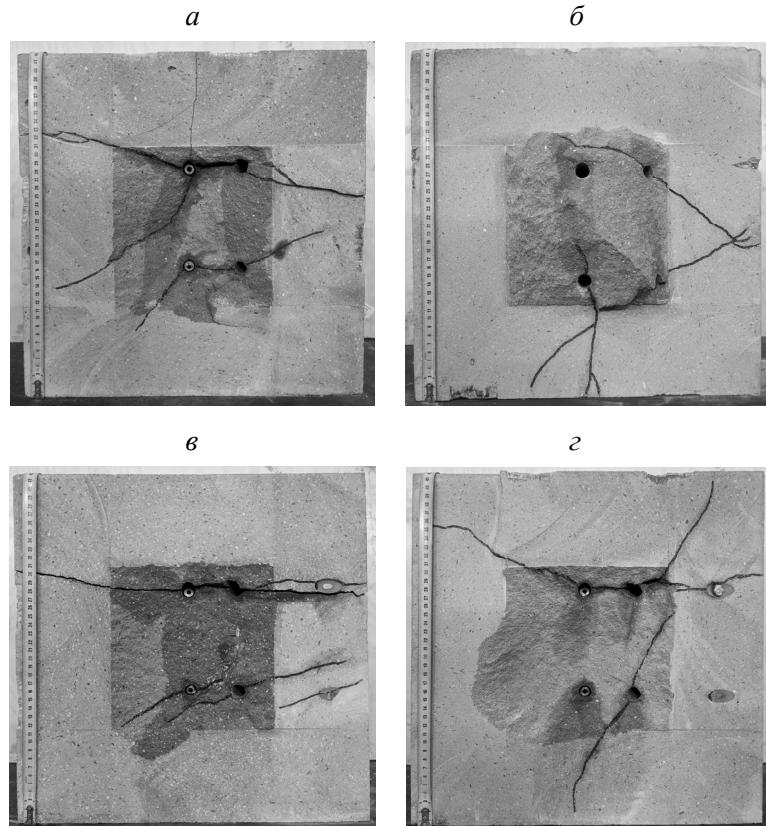


Рис. 5. Траектории трещин гидроразрыва в блоках 1–4 (а–г) в плоскости распила, отстоящей на 120 мм от верхней границы блоков

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° .

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 Jaberi 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 стволов // ФТПРПИ. — 2022. — № 5. — С. 49–62.
26. **Патутин А. В., Скулкин А. А., Прасолова В. С.** Физическое моделирование гидроразрыва скважины с боковым стволов в искусственных блоках // ФТПРПИ. — 2023. — № 2. — С. 12–20.

*Поступила в редакцию 08/1 2024
После доработки 19/1 2024
Принята к публикации 24/1 2024*