

УДК 622.234.573

Патутин Андрей Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
Сибирское отделение РАН,
630091, г. Новосибирск, Красный пр., 54
e-mail: andrey.patutin@gmail.com

Скулкин Александр Александрович

младший научный сотрудник,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
Сибирское отделение РАН
e-mail: chuptt@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИДРОРАЗРЫВА X-ОБРАЗНОЙ СИСТЕМЫ СКВАЖИН В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ*

Аннотация:

Представлены результаты лабораторных исследований закономерностей развития трещины гидроразрыва, создаваемой в двух пересекающихся скважинах в неоднородном поле напряжений. Эксперимент проводился в искусственных кубических блоках из пескобетона, а также его смеси с 2-миллиметровой фракцией угля. Скважины проходились безударным способом, одна из них была вертикальной. Для подачи рабочей жидкости в образовавшийся X-образный интервал нагружения использовалось специальное устройство с накерами нажимного типа из полиуретана.

Внутренняя структура блоков и траектории сформированных трещин изучались методом компьютерной томографии, основанном на ослаблении рентгеновского излучения различными по плотности породами и включениями. После выполнения разрывов оценивали величину раскрытия трещин в различных материалах, а также особенности их распространения в зависимости от геометрических параметров задачи и сжимающего поля напряжений.

Установлено, что в однородном поле напряжений скважины с высокой вероятностью объединятся единым продольным разрывом, расположенным в плоскости, пересекающей оси скважин вне зависимости от угла между ними.

В случае действия максимального напряжения, направленного перпендикулярно этой плоскости, в более крепких блоках трещина образуется на стенке одной из скважин по направлению действия данного напряжения. В блоках с добавлением угольной фракции также происходит соединение скважин разрывом, однако с увеличением расстояния между скважинами трещина переориентируется в направлении действия максимального напряжения.

Ключевые слова: Гидроразрыв, лабораторный эксперимент, стенд, физическое моделирование, трещина, напряженное состояние, компьютерная томография.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.047

Patutin Andrey V.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Institute of Mining n.a. N.A.Chinakal,
Siberian Branch of RAS,
630091 Novosibirsk, 54 Krasnyi Av.
e-mail: andrey.patutin@gmail.com

Skulkin Alexander A.

Junior Researcher,
Institute of Mining n.a. N.A.Chinakal,
Siberian Branch of RAS
e-mail: chuptt@yandex.ru

STUDY OF HYDRAULIC FRACTURING OF AN X-SHAPED SYSTEM OF BOREHOLES IN LABORATORY CONDITIONS

Abstract:

The paper presents the results of laboratory studies of the development of a hydraulic fracture created in two intersecting boreholes in a non-uniform stress field. The experiment was carried out in artificial cubic blocks of sandcrete, as well as its mixture with a 2 mm coal fraction. The boreholes were drilled without percussion, one of them was vertical. To supply the working fluid to the resulting X-shaped loading interval, a special tool with compression packers made of polyurethane was used.

The internal structure of the blocks and the trajectories of the formed cracks were studied by the method of computed tomography, based on the attenuation of X-ray radiation from rocks and inclusions of different density. After hydraulic fracturing was completed, the opening of fractures in various materials was estimated, as well as particular features of its propagation depending on the geometric parameters of the problem and the compressive stress field. It has been established that in a uniform stress field, boreholes are highly likely to be united by a single longitudinal fracture located in a plane intersecting the axes of the boreholes, regardless of the angle between them.

In the case of the presence of the maximum compressive stress directed perpendicular to this plane, in stronger blocks a fracture is formed on the wall of one of the boreholes in the direction of this stress. In sandcrete blocks with the addition of coal fraction, the boreholes are also connected by a single fracture; however, with an increase in the distance between them, the fracture is reoriented in the direction of the maximum compressive stress.

Key words: Hydraulic fracturing, laboratory experiment, test bench, physical modeling, fracture, stress state, computed tomography.

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

Введение

В основе метода гидравлического разрыва пласта (ГРП) лежит формирование искусственных трещин в породном массиве за счет подачи рабочей жидкости в изолированный интервал скважины. При разработке твердых полезных ископаемых в шахтных условиях метод используется для измерения действующих напряжений [1 – 3], разупрочнения пород кровли и ее управляемой посадки [4, 5], интенсификации добычи метана угольных пластов [6, 7], защиты подземных выработок с помощью противодиффузионных завес [8]. Одним из важнейших факторов, влияющих на эффективность проводимого гидроразрыва, является возможность создавать трещины заданной направленности. Для этого могут применяться различные способы и подходы, например, бурение близкорасположенных скважин и их синхронный разрыв, реализация дополнительной направленной нагрузки в заданном интервале скважины или нарезка инициирующих щелей на ее стенках, использование в качестве рабочего агента газа или жидкости с определенными свойствами [9 – 13]. Наблюдаемый в последние годы рост количества работ, посвященных направленному ГРП, подтверждает актуальность подобных исследований.

Подробнее рассмотрим те способы, в которых для управления траекторией трещины изменяют геометрические параметры системы, такие как количество скважин одновременного разрыва, их взаимное расположение, наличие боковых стволов.

Выполнение гидроразрыва нескольких близкорасположенных скважин способствует формированию единой продольной трещины. Анализ фильтрационных сопротивлений зон дренирования в угольном пласте в зависимости от его мощности, ориентации разрывов и расстояния между скважинами показывает высокую эффективность продольного гидроразрыва в плоскости пласта для целей дегазации [14]. В работах [9, 15] приведены результаты численных и физических экспериментов по разрыву трех параллельных скважин, на стенках которых создавалась инициирующая нарезка вдоль их стволов. Авторы отмечают перспективность такого подхода, однако указывают, что когда угол между направлением действия максимального горизонтального напряжения σ_H и линией скважин составляет более 30° , а также выполняется условие $(\sigma_H - \sigma_h)/\sigma_h > 0,5$, то происходит быстрый разворот трещины в сторону действия σ_H .

С помощью математического моделирования и лабораторных испытаний установлены особенности развития трещины гидроразрыва между двумя параллельными скважинами в неоднородном поле напряжений [16]. Варианты траекторий разрыва рассчитывались в зависимости от угла наклона плоскости начальной трещины относительно оси скважин и действующих напряжений. В ходе физического эксперимента установлено, что соединение двух параллельных скважин трещиной происходит при условии, когда расстояние между их центрами превышает диаметр не более чем в 2 – 3 раза.

Проходка близкорасположенных параллельных скважин в горном массиве является технически сложной задачей, которая может быть решена только с использованием дорогостоящих установок направленного бурения. Вместо этого возможна нарезка бокового ствола из основного, при этом в области сопряжения формируется V-образный концентратор напряжений, являющийся инициатором разрыва и способствующий формированию продольной трещины в плоскости, соединяющей оси стволов. Особенности распространения трещин в подобной постановке исследовались в [17, 18].

В работе [19] представлена математическая модель для расчетов параметров разрыва, которая учитывает направление микротрещиноватости угля. Авторами предложен метод реализации ГРП в скважинах с несколькими боковыми ответвлениями, апробированный в шахтных условиях, и получена высокая сходимость результатов с теоретическими расчетами. Установлено, что применение такой технологии позволяет снизить

давление разрыва угольного пласта на 12–25 % и контролировать направление начального трещинообразования.

Одним из перспективных методов контроля траекторий создаваемых в лабораторных условиях трещин гидроразрыва является метод компьютерной томографии (КТ) [20]. Метод основан на различии в плотностях горной породы, минеральных включений, пустот, трещин и заполняющих их пластовых флюидов. В процессе сканирования записывается массив из полутоновых изображений, яркость которых характеризует степень поглощения рентгеновского излучения, а затем, с помощью математического моделирования, реконструируется объемная трехмерная модель образца. Опыт работ по моделированию ГРП в крупных кубических образцах показывает, что такой подход позволяет достаточно хорошо восстанавливать общий вид траектории разрыва [21, 22].

В данной работе приведены результаты лабораторных исследований процесса формирования и распространения трещины гидроразрыва, создаваемой в двух пересекающихся скважинах в неоднородном поле напряжений. Для анализа траекторий образующихся трещин применяли метод КТ.

Подготовка образцов для испытаний

Для исследования особенностей распространения трещины гидроразрыва использовали лабораторный стенд независимого трехосного нагружения; его подробное описание приведено в [23, 24]. Размер кубических блоков для проведения лабораторных испытаний составлял 200 мм. Сжимающая нагрузка на образец по двум ортогональным направлениям обеспечивалась 4 гидравлическими домкратами ДН10П10 грузоподъемностью 10 тс; пятый домкрат применялся для нагружения образца по вертикальной оси.

Искусственные блоки изготавливали из пескобетона марки М300 и его смеси с 2-миллиметровой фракцией угля. С помощью оборудования ЦКП геомеханических, геофизических и геодинамических измерений СО РАН определяли механические свойства нескольких образцов отвердевших смесей при различном объемном содержании угля (табл. 1). Для выполнения дальнейших экспериментов было принято решение использовать смесь пескобетона и угля в объемной пропорции 2 : 1 [25].

Таблица 1

Механические свойства отвердевшей смеси пескобетона М300 и угольной фракции 2 мм

№ образца смеси	Объемное соотношение пескобетон : уголь	Предел прочности на сжатие, МПа	Модуль упругости, ГПа
1	1 : 0 (без угля)	21,47	10,5
2	4 : 1	8,43	1,21
3	2 : 1	3,58	0,31
4	1 : 1	1,49	0,12

Заливка состава осуществлялась в специальные формы, обеспечивающие параллельность граней, затем блоки выдерживались 21 день до полного отвердевания. После этого в них пробуривали по две сквозных пересекающихся в центре скважины диаметром 13 мм. Одна из скважин была вертикальной, а другая образовывала с ней угол γ (рис. 1а, б).

Всего было изготовлено 10 блоков размером 200 × 200 × 200 мм из двух вариантов составов с различным взаимным расположением скважин. Для дальнейших исследований отобрали 7. В наклонной скважине с помощью эпоксидной смолы заклеивали входное и выходное отверстие на глубину 20 – 30 мм от поверхности блока, а гидроразрыв выполняли через вертикальную скважину.

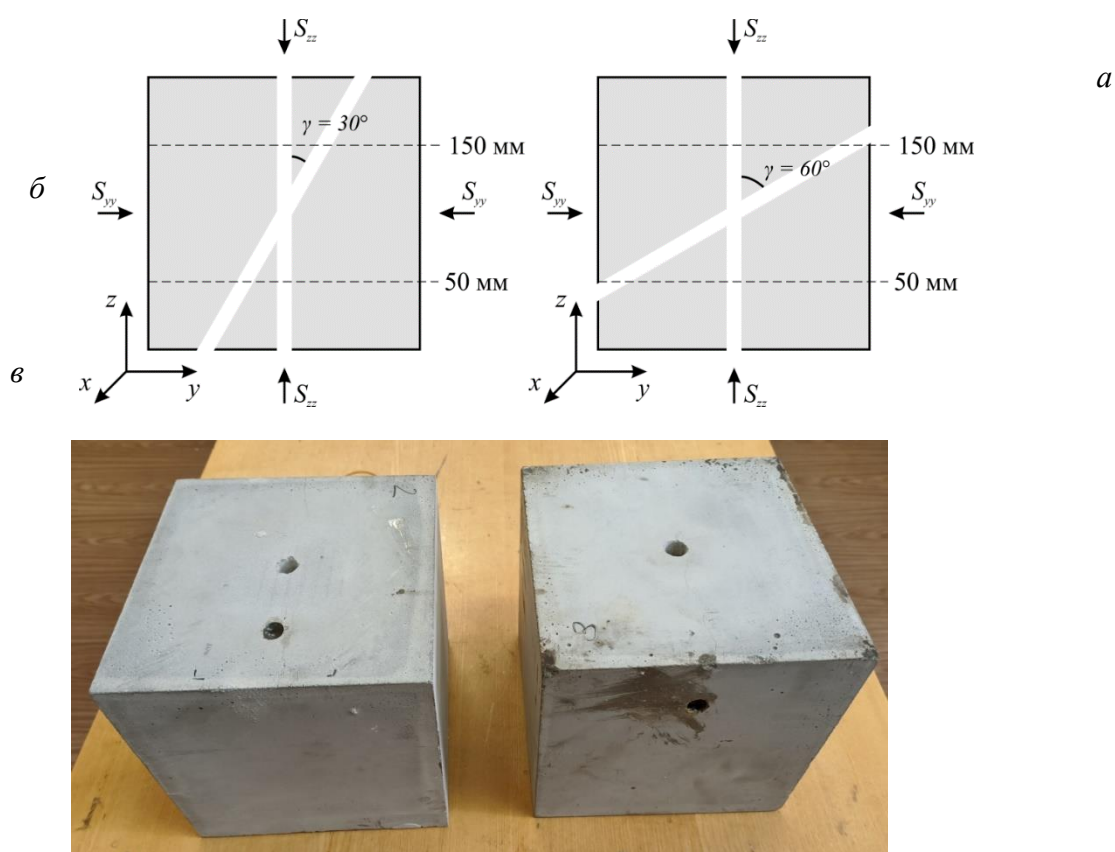


Рис. 1. Модель блока с пересекающимися скважинами при $\gamma = 30^\circ$ (а), $\gamma = 60^\circ$ (б) и фотография готовых блоков из пескобетона со скважинами (в)

Результаты физического моделирования гидроразрыва

В ходе эксперимента в вертикальную скважину устанавливали устройство, оборудованное нажимными уплотнительными элементами. При распоре элементов в блоке создавалась X-образная зона нагружения. В качестве рабочей жидкости использовали дистиллированный глицерин, подачу которого в интервал разрыва контролировали с помощью пресс-расходомера. В табл. 2 приведены основные параметры блоков, условия их нагружения по трем взаимноортогональным направлениям в ходе физического моделирования, а также зарегистрированные давления гидроразрыва.

Таблица 2

Характеристики блоков, параметры эксперимента и давления гидроразрыва

№ блока	Объемное соотношение пескобетон : уголь	Угол γ , град	Условия нагружения, МПа			Давление гидроразрыва, МПа
			S_{xx}	S_{zz}	S_{yy}	
1	1 : 0	30	0,5	0,5	0,5	8,79
2	1 : 0	30	1,5	0,5	0,5	13,47
3	1 : 0	60	0,5	0,5	0,5	6,54
4	1 : 0	60	1,5	0,5	0,5	14,64
5	2 : 1	30	1,5	0,5	0,5	4,73
6	2 : 1	30	1,5	0,5	0,5	4,29
7	2 : 1	30	1,5	0,5	0,5	4,15

После выполнения разрыва и сброса давления в домкратах в трещину под небольшим давлением повторно закачивался глицерин с целью размыкания ее берегов и лучшего трассирования методом компьютерной томографии, который использовался для

изучения внутренней структуры блоков. Исследования проводились на многосрезовом компьютерном томографе Canon Aquilion PRIME SP 160 по методике спирального сканирования с построением реконструкций с толщиной срезов 0,1 мм. Установлено, что раскрытие трещин гидроразрыва составляло 0,2–0,7 мм для блоков из пескобетона и около 0,5–1,2 мм для блоков с добавлением угольной фракции.

В однородном поле сжатия распространение трещины происходило из вертикального ствола преимущественно в плоскости скважин. На рис. 2а приведены горизонтальные срезы блока 1 в плоскости $xу$. По результатам сканирования установлено, что разрыв произошел в верхней половине блока (при $z > 100$ мм, см. рис. 1), а скважины были соединены продольной трещиной примерно до плоскости $z = 160$ мм. Выше этой плоскости трещина выходит за пределы наклонной скважины и достигает верхней границы блока.

В блоке 3 разрыв развивался по схожему сценарию. Изначально трещина возникла в вертикальной скважине и вышла во вторую, однако, начиная с плоскости $z = 140$ мм и выше, видно, что трещина отклоняется от плоскости скважин (рис. 2б).

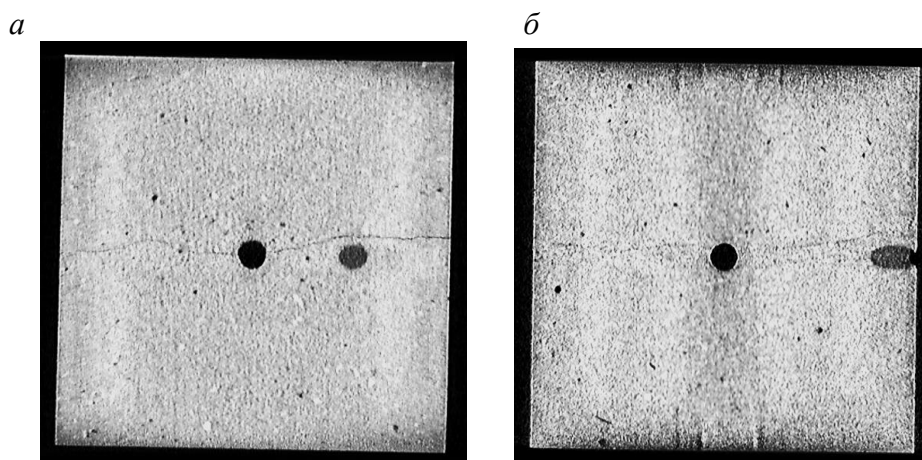


Рис. 2. Трещина гидроразрыва в блоке 1 в плоскости $z = 180$ мм (а) и в блоке 3 в плоскости $z = 150$ мм (б)

В случаях, когда горизонтальные напряжения S_{xx} превышали сжимающие, наблюдалась иная картина. Например, в блоке 2 инициирование разрыва произошло в наклонной скважине с выходом на поверхность блока (рис. 3а). При разрыве блока 4 скважины соединились в единую систему, при этом «внешние» крылья трещины отклонились в сторону действия сжимающего напряжения S_{xx} (рис. 3б).

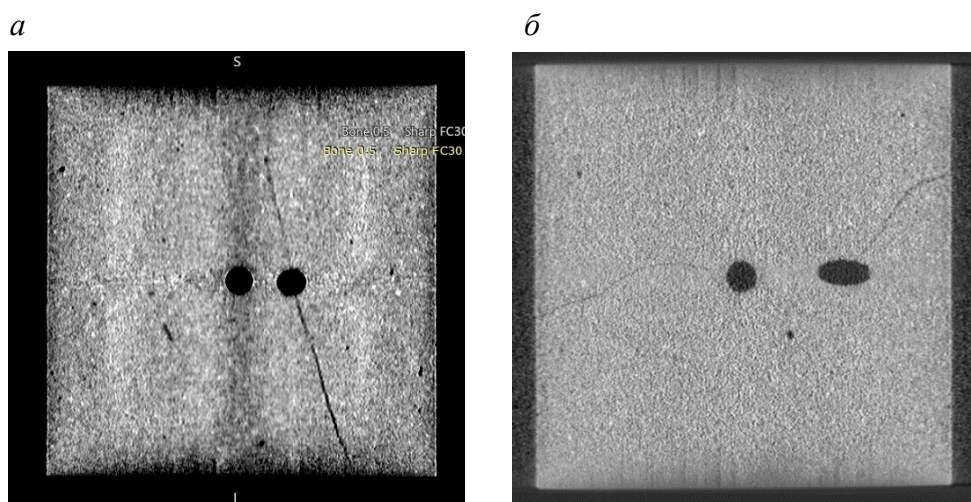


Рис. 3. Трещина гидроразрыва в блоке 2 в плоскости $z = 150$ мм (а) и в блоке 4 в плоскости $z = 130$ мм (б)

В блоках пескобетона с добавлением угольной фракции угол γ между скважинами составлял 30° . Установлено, что, несмотря на преимущественное распространение трещин вдоль действия максимального напряжения S_{xx} , скважины соединялись между собой разрывом при небольшом расхождении друг от друга (рис. 4).

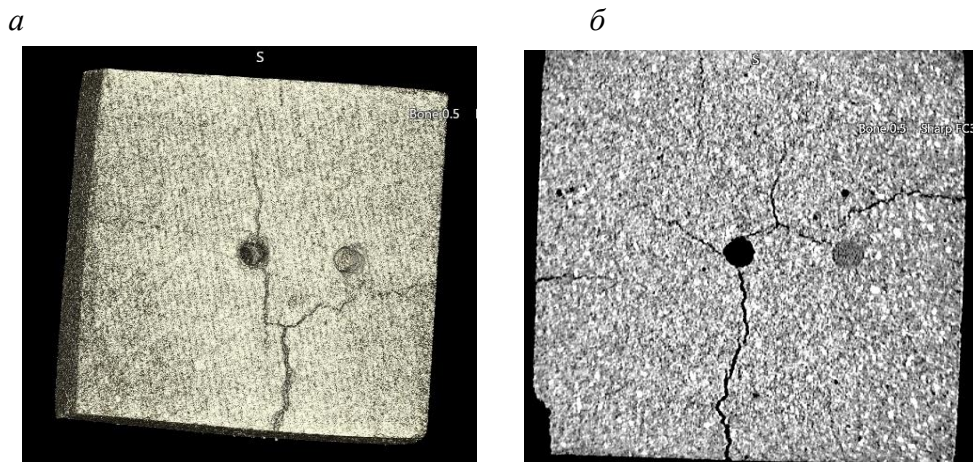


Рис. 4. Общий вид верхней границы блока 5 (а) и образовавшиеся трещины внутри блока 6 на срезе в плоскости $z=185$ мм (б)

В некоторых случаях это объединение в единую фильтрационную систему происходило и достаточно далеко от места пересечения скважин. Также видно, что трещины в таких блоках имеют более сложную структуру и могут сильно разветвляться.

Выводы

Установлены особенности распространения трещин гидроразрыва в искусственных блоках с длиной ребра 200 мм из пескоцемента и его смеси с 2-миллиметровой фракцией угля. Трещина создавалась путем подачи рабочей жидкости в изолированную X-образную зону, образованную при пересечении вертикальной и наклонной модельных скважин.

В однородном поле напряжений продольная трещина развивается в плоскости, которая соединяет оси скважин вне зависимости от угла γ . За счет низкой скорости подачи рабочей жидкости и падения давления в гидравлической системе разрыв формируется в одной из скважин, а не одновременно в обеих. В случае действия максимального напряжения S_{xx} , направленного перпендикулярно соединяющей оси скважин плоскости, в крепких породах более вероятно образование трещины по направлению действия данного напряжения.

В блоках с добавлением угольной фракции скважины чаще соединяются разрывом, в особенности когда расхождение между ними все еще остается небольшим. Это можно объяснить образованием техногенной трещиноватости при бурении, более обширной микротрещиноватостью блоков с углем и его слабыми механическими свойствами. При этом в той области блока, где влияние наклонной скважины практически отсутствует, трещина может распространяться по направлению действия напряжения S_{xx} .

Список литературы

1. Beltyukov N.L., 2021. Studying the Kaiser effect during modeling of rock loading conditions using the NX-borehole jack. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1945, 012023.
2. Курленя М.В., Сердюков С.В., Патутин А.В., 2015. Определение деформационных свойств горных пород по данным прессиометрических испытаний в интервале гидроразрыва скважины. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 4, С. 96 – 102.

3. Rubtsova E.V., Skulkin A.A., 2018. Hydraulic fracturing stress measurement in underground salt rock mines at Upper Kama Deposit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 134, 012049.
4. Леконцев Ю.М., Сажин П.В., 2019. Проблемы управления труднообрушающимися кровлями при отработке пологих угольных пластов. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, Т. 2, № 4, С. 162 – 169.
5. Yang J., Liu B., Bian W., Chen K., Wang H., Cao C., 2021. Application cumulative tensile explosions for roof cutting in Chinese underground coal mines. *Archives of Mining Sciences*, Vol. 66, P. 421 – 435.
6. Jeffrey R., Mills K., Zhang X., 2013. Experience and results from using hydraulic fracturing in coal mining. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Mine Hazards Prevention and Control*, Brisbane, P. 110 – 116.
7. Plaksin M.S. Rodin R.I., 2019. Improvement of degasification efficiency by pulsed injection of water in coal seam. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 377, 012052.
8. Shilova T., Patutin A., Rybalkin L., Serdyukov S., Hutornoy V., 2017. Development of the impermeable membranes using directional hydraulic fracturing. *Procedia Engineering*, Vol. 191, P. 520 – 524.
9. Lu W., He C. 2020. Numerical simulation of the fracture propagation of linear collaborative directional hydraulic fracturing controlled by pre-slotted guide and fracturing boreholes. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 235, 107128.
10. Pavlov V.A., Serdyukov S.V., Martynyuk P.A., Patutin A.V., 2019. Optimisation of borehole-jack fracturing technique for in situ stress measurement. *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 13, № 5, P. 451 – 457.
11. Cheng Y., Lu Z., Du X., Zhang X., Zeng M., 2020. A crack propagation control study of directional hydraulic fracturing based on hydraulic slotting and a nonuniform pore pressure field. *Geofluids*, 8814352.
12. Cha M., Alqahtani N.B., Yin X., Kneafsey T.J. et al., 2017. Laboratory system for studying cryogenic thermal rock fracturing for well stimulation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 156, P. 780 – 789.
13. Курленя М.В., Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Патутин А.В., Сердюков С.В., 2012. Пеногель для гидроразрыва газоносных угольных пластов в шахтных условиях. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 6, С. 3 – 11.
14. Сердюков С.В., Курленя М.В., Рыбалкин Л.А., Шилова Т.В., 2019. Влияние гидроразрыва угля на фильтрационное сопротивление зоны дренирования дегазационной скважины. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 2, С. 3 – 13.
15. Cheng Y., Lu Y., Ge Z., Cheng L., Zheng J., Zhang W., 2018. Experimental study on crack propagation control and mechanism analysis of directional hydraulic fracturing. *Fuel*, Vol. 218, P. 316 – 324.
16. Патутин А.В., Азаров А.В., Рыбалкин Л.А., Дробчик А.Н., Сердюков С.В., 2022. Устойчивость развития трещины гидроразрыва между двумя параллельными скважинами. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 2, С. 34 - 44.
17. Азаров А.В., Патутин А.В., Сердюков С.В., 2022. О форме трещин гидроразрыва в окрестности сопряжения скважины с боковым стволом. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 5, С. 49 – 62.
18. Патутин А.В., Скулкин А.А., Прасолова В.С., 2023. Физическое моделирование гидроразрыва скважины с боковым стволом в искусственных блоках. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 2 (принята к печати).
19. Zuo S., Ge Z., Deng K., Zheng J., Wang H., 2020. Fracture initiation pressure and failure modes of tree-type hydraulic fracturing in gas-bearing coal seams. *Journal of Natural*

Gas Science and Engineering, Vol. 77, 103260.

20. Савицкий Я.В., 2015. Современные возможности метода рентгеновской томографии при исследовании керн нефтяных и газовых месторождений. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*, Т. 14, № 15, С. 28 – 37.

21. Cao W., Yildirim B., Durucan S., Wolf K. H., Cai W., Agrawal H., Korre A., 2021. Fracture behaviour and seismic response of naturally fractured coal subjected to true triaxial stresses and hydraulic fracturing. *Fuel*, Vol. 288, 119618.

22. Yushi Z., Shicheng Z., Tong Z., Xiang Z., Tiankui G., 2016. Experimental investigation into hydraulic fracture network propagation in gas shales using CT scanning technology. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, P. 33 – 45.

23. Рубцова Е.В., Скулкин А.А., 2017. О физическом моделировании процесса измерительного гидроразрыва в модельных образцах при их неравнокомпонентном нагружении. *Проблемы недропользования*, № 2 (13), С. 42 – 46. DOI: <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.02.042>

24. Leontiev A., Rubtsova E., 2019. Analysis of crack formation in model specimens during hydraulic fracturing in holes. *Trigger Effects in Geosystems, The 5th International Conference*, Moscow, P. 247 – 256.

25. Chen J., Li X., Cao H., Huang L., 2020. Experimental investigation of the influence of pulsating hydraulic fracturing on pre-existing fractures propagation in coal. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 189, 107040.

References

1. Beltyukov N.L., 2021. Studying the Kaiser effect during modeling of rock loading conditions using the NX-borehole jack. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1945, 012023.

2. Kurlenya M.V., Serdyukov S.V., Patutin A.V., 2015. Opređenje deformatsi-onnykh svoistv gornyykh porod po dannym pressiometricheskikh ispytaniy v intervale gidrorazryva skvazhiny [Assessment of deformation properties of rocks by pressuremeter testing in hydrofractured interval]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopa-emykh*, № 4, P. 96 – 102.

3. Rubtsova E.V., Skulkin A.A., 2018. Hydraulic fracturing stress measurement in underground salt rock mines at Upper Kama Deposit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 134, 012049.

4. Lekontsev Yu.M., Sazhin P.V., 2019. Problemy upravleniya trudnoobrushayushchimisya krovlyami pri otrabotke pologikh ugol'nykh plastov [Problems of control of hardly falling roofs during development of flat coal layers]. *Interekspo Geo-Sibir'*, V. 2, № 4, P. 162 - 169.

5. Yang J., Liu B., Bian W., Chen K., Wang H., Cao C., 2021. Application cumulative tensile explosions for roof cutting in Chinese underground coal mines. *Archives of Mining Sciences*, Vol. 66, P. 421 – 435.

6. Jeffrey R., Mills K., Zhang X., 2013. Experience and results from using hydraulic fracturing in coal mining. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Mine Hazards Prevention and Control*, Brisbane, P. 110 – 116.

7. Plaksin M.S. Rodin R.I., 2019. Improvement of degasification efficiency by pulsed injection of water in coal seam. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 377, 012052.

8. Shilova T., Patutin A., Rybalkin L., Serdyukov S., Hutornoy V., 2017. Development of the impermeable membranes using directional hydraulic fracturing. *Procedia Engineering*, Vol. 191, P. 520 – 524.

9. Lu W., He C. 2020. Numerical simulation of the fracture propagation of linear collaborative directional hydraulic fracturing controlled by pre-slotted guide and fracturing boreholes. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 235, 107128.
10. Pavlov V.A., Serdyukov S.V., Martynyuk P.A., Patutin A.V., 2019. Optimisation of borehole-jack fracturing technique for in situ stress measurement. *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 13, № 5, P. 451 – 457.
11. Cheng Y., Lu Z., Du X., Zhang X., Zeng M., 2020. A crack propagation control study of directional hydraulic fracturing based on hydraulic slotting and a nonuniform pore pressure field. *Geofluids*, 8814352.
12. Cha M., Alqahtani N.B., Yin X., Kneafsey T.J. et al., 2017. Laboratory system for studying cryogenic thermal rock fracturing for well stimulation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 156, P. 780 – 789.
13. Kurlenya M.V., Altunina L.K., Kuvshinov V.A., Patutin A.V., Serdyukov S.V., 2012. Penogel' dlya gidrorazryva gazonosnykh ugol'nykh plastov v shakhtnykh usloviyakh [Froth-gel for hydrofracturing the gas-bearing coal layers in mine conditions]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 6, P. 3 – 11.
14. Serdyukov S.V., Kurlenya M.V., Rybalkin L.A., Shilova T.V., 2019. Vliyanie gidrorazryva uglya na fil'tratsionnoe soprotivlenie zony drenirovaniya degazatsionnoi skvazhiny [Influence of hydraulic fracturing of coal on filtration resistance of drainage area around a degassing hole]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 2, P. 3 – 13.
15. Cheng Y., Lu Y., Ge Z., Cheng L., Zheng J., Zhang W., 2018. Experimental study on crack propagation control and mechanism analysis of directional hydraulic fracturing. *Fuel*, Vol. 218, P. 316 – 324.
16. Patutin A.V., Azarov A.V., Rybalkin L.A., Drobchik A.N., Serdyukov S.V., 2022. Ustoichivost' razvitiya treshchiny gidrorazryva mezhdru dvumya parallel'nymi skvazhinami [Stableness of fracture propagation between two parallel boreholes]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 2, P. 34 – 44.
17. Azarov A.V., Patutin A.V., Serdyukov S.V., 2022. O forme treshchin gidrorazryva v okrestnosti sopryazheniya skvazhiny s bokovym stvolom [On shapes of hydraulic fractures near borehole-and-branch hole junction]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 5, P. 49 – 62.
18. Patutin A.V., Skulkin A.A., Prasolova V.S., 2023. Fizicheskoe modelirovanie gidrorazryva skvazhiny s bokovym stvolom v iskusstvennykh blokakh [Physical modeling of hydraulic fracturing of a sidetracked borehole in artificial blocks]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 2 (prinyata k pečati).
19. Zuo S., Ge Z., Deng K., Zheng J., Wang H., 2020. Fracture initiation pressure and failure modes of tree-type hydraulic fracturing in gas-bearing coal seams. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 77, 103260.
20. Savitskii Ya.V., 2015. Sovremennye vozmozhnosti metoda rentgenovskoi tomografii pri issledovanii kerna neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii [Current features of X-ray tomography in examination of core samples from oil and gas deposits]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, T. 14, № 15, P. 28 – 37.
21. Cao W., Yildirim B., Durucan S., Wolf K. H., Cai W., Agrawal H., Korre A., 2021. Fracture behaviour and seismic response of naturally fractured coal subjected to true triaxial stresses and hydraulic fracturing. *Fuel*, Vol. 288, 119618.
22. Yushi Z., Shicheng Z., Tong Z., Xiang Z., Tiankui G., 2016. Experimental investigation into hydraulic fracture network propagation in gas shales using CT scanning technology. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, P. 33 – 45.
23. Rubtsova E.V., Skulkin A.A., 2017. O fizicheskom modelirovanii protsessa izmeritel'nogo gidrorazryva v model'nykh obraztsakh pri ikh neravnokomponentnom nagruzhenii [On physical simulation of the process of measurement hydrofracturing in specimens under

their non-equicomponent loading]. Problemy nedropol'zovaniya, № 2 (13), P. 42 - 46. DOI: <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.02.042>

24. Leontiev A., Rubtsova E., 2019. Analysis of crack formation in model specimens during hydraulic fracturing in holes. Trigger Effects in Geosystems, The 5th International Conference, Moscow, P. 247 – 256.

25. Chen J., Li X., Cao H., Huang L., 2020. Experimental investigation of the influence of pulsating hydraulic fracturing on pre-existing fractures propagation in coal. Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 189, 107040.