2023

УДК 622.234.573

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОРАЗРЫВА СКВАЖИНЫ С БОКОВЫМ СТВОЛОМ В ИСКУССТВЕННЫХ БЛОКАХ

А. В. Патутин¹, А. А. Скулкин¹, В. С. Прасолова^{2,3}

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: patutin@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия ²ЗАО "Клиника Санитас", ул. Молдавская, 50, 633204, г. Искитим, Россия ³Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия

Приведены результаты физического моделирования гидравлического разрыва, выполненного в кубических блоках с длиной ребра 200 мм, изготовленных из пескобетона и его смеси с угольной фракцией, в неоднородном поле напряжений. Трещина создавалась в вертикальной скважине с боковым стволом. Методом компьютерной томографии исследовались сохранность концентратора напряжений, который образуется в месте соединения скважины и бокового ствола, фактический диаметр скважины, наличие техногенной трещиноватости от бурения, размеры пор, образовавшихся при застывании искусственных блоков, а также траектории полученных разрывов. Установлено влияние геометрических параметров задачи и сжимающего поля напряжений на направление распространения трещин.

Искусственный блок, гидроразрыв, трещина, скважина, напряженное состояние, физическое моделирование, компьютерная томография

DOI: 10.15372/FTPRPI20230202

Повышение эффективности метода гидравлического разрыва пласта (ГРП), применяемого при разработке твердых полезных ископаемых, в первую очередь связано с поиском возможностей для управления траекторией трещины. Опыт работ в условиях подземных горных выработок показывает, что широкое распространение получили способы направленного гидроразрыва, в которых используется нарезка поперечной инициирующей щели на стенке скважины с помощью специальных устройств [1-3].

Исследуя наиболее перспективные подходы для реализации направленного ГРП, можно выделить следующие основные факторы, влияющие на процесс трещинообразования и окончательную форму разрыва: взаимное расположение скважин и их геометрия, наличие боковых стволов, перфорация; свойства рабочего агента, его агрегатное состояние и способ закачки [4–9]; технические средства и устройства для выполнения дополнительных воздействий в целевом интервале скважины [10–12].

№ 2

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

Геомеханические исследования керна проведены с использованием оборудования ЦКП геомеханических, геофизических и геодинамических измерений СО РАН.

Рассмотрено влияние геометрических параметров системы. Результаты лабораторных исследований процесса перфорации в особо крупных блоках (762 × 762 × 914 мм) в неравномерном поле напряжений позволили разработать новый способ инициирования трещины, при этом регистрируемое давление разрыва было значительно ниже, чем при использовании обычных перфорационных отверстий [13].

Одновременный ГРП нескольких параллельных скважин дает возможность сформировать протяженную продольную трещину вдоль простирания пласта, что в некоторых случаях может быть эффективно для интенсификации дегазации углепородного массива. В [14, 15] приведены результаты численных и физических экспериментов по разрыву трех параллельных скважин, на стенках которых выполнена инициирующая нарезка вдоль осей. Показана перспективность метода, однако отмечается, что при определенных соотношениях минимального и максимального сжимающих напряжений происходит быстрый разворот трещины в сторону действия последнего. Отметим, что создание инициирующей щели вдоль ствола скважины может оказаться технически трудной задачей и усложнит применение данного подхода. Вопросы разрушения негабаритов и откола каменных блоков с применением строчки близкорасположенных скважин подробно рассматривались в [16], а также в некоторых патентах [17].

В ходе математического моделирования гидроразрыва между двумя параллельными скважинами в неоднородном поле напряжений и лабораторных испытаний установлены некоторые особенности его развития [18]. При изменении угла наклона плоскости начальной трещины относительно оси скважин и действующих напряжений получены различные варианты траекторий разрыва. Результаты физического эксперимента показали, что соединение двух параллельных скважин трещиной происходит при условии, когда расстояние между скважинами превышает их диметр не более чем в 2–3 раза. В [19] представлено решение задачи создания единой плоскости разрыва из пяти параллельных скважин в плоской постановке.

Вместо дорогостоящего направленного бурения близкорасположенных параллельных скважин технически проще использовать скважину с боковым стволом. В области его ответвления формируется V-образный концентратор напряжений, являющийся инициатором разрыва и способствующий формированию продольной трещины в плоскости, соединяющей оси скважины и бокового ствола [20]. Особенности распространения трещин в подобной постановке численно исследовались в [21]. Использовались два подхода: первый — решение статической задачи и определение направления развития трещины на основе вычисления коэффициентов интенсивности напряжений K₁ и K₁₁, второй — моделирование процесса разрыва в квазистатическом приближении с помощью расширенного метода конечных элементов (XFEM).

В [22] предложен метод гидравлического разрыва скважины с несколькими боковыми ответвлениями, пробуренными в угольном пласте. Разработанная математическая модель учитывает направление микротрещиноватости угля, хорошо предсказывает давление разрыва и место его формирования. Данный метод апробирован в шахтных условиях, где получена высокая сходимость результатов с теоретическими расчетами. Установлено, что применение технологии позволяет снизить давление разрыва угольного пласта на 12–25% и контролировать направление начального трещинообразования. К некоторым недостаткам такого подхода можно отнести ограничения на длину создаваемых боковых ответвлений.

В настоящей статье приведены результаты физического моделирования гидравлического разрыва скважины с боковым стволом в искусственных блоках в неоднородном поле напряжений. Внутреннее строение блоков и траектории образующихся трещин исследовались с помощью метода компьютерной томографии (КТ).

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД И ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ

Конструкция лабораторного стенда и принцип его работы подробно описаны в [23–25]. Стенд смонтирован на плите гидравлического пресса ПГ-100 и разработан для моделирования гидроразрыва в кубических блоках с длиной ребра 200 мм. Сжимающая нагрузка на образец по двум ортогональным направлениям осуществлялась четырьмя гидравлическими домкратами ДН10П10 грузоподъемностью 10 тс; пятый домкрат использовался для нагружения образца по вертикальной оси. В стенде реализована возможность выполнять ГРП в условиях независимого трехосного сжатия. Схема лабораторного стенда и его общий вид приведены на рис. 1.



Рис. 1. Схема лабораторного стенда (*a*) и его общий вид с подготовленным для испытаний блоком (*б*): *1* — насос; *2* — кран запорный; *3* — манометр; *4*, *5* — коллекторы; *6* — преобразователь давления МИДА-ДИ-51П; *7* — устройство преобразования и передачи данных; *8* — кабель связи; *9* — портативный компьютер; *10* — гидравлический домкрат; *11* — образец; *12* — трубопроводы высоконапорные

Искусственные блоки изготавливались из пескобетона марки M300 и его смеси с двухмиллиметровой фракцией угля. Исследования механических свойств образцов отвердевших смесей при различном объемном содержании угля проводились на оборудовании ЦКП геомеханических, геофизических и геодинамических измерений СО РАН; их результаты приведены в табл. 1. Для выполнения дальнейших экспериментов принято решение использовать смесь пескобетона и угля в объемной пропорции 2:1.

Номер 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

ТАБЛИЦА 1. Механические свойства отвердевшей смеси пескобетона М300 и угольной фракции 2 мм

После заливки составов в специальные формы, обеспечивающие параллельность граней, их выдерживали 21 день до полного отвердевания блоков. Для моделирования скважины с боковым стволом использовался следующий подход. В блоке безударным способом пробуривались две сквозные скважины диаметром 13 мм, пересекающиеся в центре. Одна из скважин была вертикальной, другая образовывала с ней угол γ (рис. 2a, δ). В наклонной скважине с помощью эпоксидной смолы заклеивались входное и выходное отверстия на глубину 20-30 мм от поверхности блока, а гидроразрыв выполнялся через вертикальную скважину. Всего изготовлено 10 блоков размером $200 \times 200 \times 200$ мм, из которых для дальнейших испытаний отобраны семь.



Рис. 2. Модель блока с пересекающимися скважинами при $\gamma = 30^{\circ}$ (*a*), $\gamma = 60^{\circ}$ (*б*) и фотография готового блока из пескобетона со скважинами (*в*)

Внутренняя структура блоков изучена методом компьютерной томографии, который основан на различии в плотностях горной породы, минеральных включений, пустот, трещин и заполняющих их пластовых флюидов. В процессе сканирования записывался массив из полутоновых изображений, яркость которых характеризует степень поглощения рентгеновского излучения, затем с помощью методов математического моделирования реконструировалась объемная трехмерная модель образца [26, 27]. Исследования проводились на многосрезовом компьютерном томографе Canon Aquilion PRIME SP 160 по методике спирального сканирования с построением высокоразрешающих и жестких реконструкций с толщиной срезов 0.1 мм (рис. 3).



Рис. 3. Результаты сканирования искусственных блоков из пескобетона при $\gamma = 30^{\circ}$ (*a*), $\gamma = 60^{\circ}$ (*б*) и блока с добавлением угольной фракции при $\gamma = 30^{\circ}$ (*в*)

В ходе контрольного сканирования исследовались состояние концентратора напряжений, который образуется при сочленении двух скважин, их диаметр, наличие техногенной трещиноватости от бурения и присутствие искусственных пор в объеме блоков. Также изучались состояние и размер эпоксидных заглушек (рис. 4).



Рис. 4. Состояние эпоксидной заглушки (*a*) и пример образовавшейся при застывании поры (*б*) в блоке пескобетона с примесью угольной фракции

Установлено, что в более крепких блоках из пескобетона диаметр пробуренных скважин практически не отличается от диаметра используемого инструмента, стенки скважин не имеют разрушений, но имеются редкие техногенные трещины глубиной до 5 мм. Во всех исследуемых блоках геометрия концентратора не нарушена, отмечается сохранность острого угла в месте пересечения скважин. В объеме блоков изредка наблюдаются сферические поры до 1–2 мм, образовавшиеся при застывании материала.

В блоках с добавлением угольной фракции диаметр скважин больше номинального на 1-2 мм, на поверхностях скважин встречаются небольшие вывалы до 2 мм, размер пор в блоках достигает 4-5 мм. Формируемый концентратор напряжений в целом сохраняет свою форму, однако в некоторых случаях видны его частичные разрушения. Отметим, что на поверхностях блоков при отвердевании образовалось несколько трещин глубиной до 30 мм; также присутствует небольшое количество техногенных трещин от бурового инструмента, которые достигают 8-10 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА

Для выполнения гидроразрыва в вертикальную скважину устанавливалось устройство, оборудованное нажимными уплотнительными элементами из полиуретана. Таким образом при распоре элементов в блоке формировалась крестообразная изолированная область, образованная пересекающимися скважинами. В качестве рабочей жидкости применялся дистиллированный глицерин, который подавался в образец с помощью пресс-расходомера.

В табл. 2 приведены характеристики блоков, условия их нагружения по трем взаимно ортогональным направлениям, а также зарегистрированные давления гидроразрыва. После проведения эксперимента давление в домкратах сбрасывалось, в трещину повторно подавался глицерин с целью размыкания ее берегов для лучшего трассирования методом КТ. Раскрытие трещин гидроразрыва составляло 0.2-0.7 мм для блоков из пескобетона и ~0.5-1.2 мм для блоков с добавлением угольной фракции.

Номер Объемное соотношение		Угол γ,	Условия нагружения, МПа			Давление
блока	пескобетон : уголь	град	S_{xx}	S_{zz}	S_{yy}	гидроразрыва, МПа
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

ТАБЛИЦА 2. Характеристики блоков, параметры эксперимента и давления гидроразрыв

В однородном поле напряжений трещина формировалась преимущественно в плоскости скважин с инициированием в вертикальной. На рис. 5a показан горизонтальный срез блока 1 в плоскости x0y. По результатам сканирования установлено, что разрыв произошел в верхней половине блока (при z > 100 мм, см. рис. 2), а скважины соединялись вертикальной продольной трещиной примерно до плоскости z = 160 мм. Выше этой плоскости трещина выходила за пределы наклонной скважины и достигала верхней границы блока. В блоке 3 разрыв развивался по схожему сценарию. Изначально трещина распространялась из вертикальной скважины, соединяя ее с наклонной, однако начиная с z = 140 мм и выше трещина отклонялась из плоскости скважин (рис. 56). На рис. 5e, z приведены результаты ручного трассирования трещины в указанных блоках, римскими цифрами I, II обозначены одинаковые ребра образцов.



Рис. 5. Трещины гидроразрыва в блоке 1 в плоскости z = 180 мм (*a*), в блоке 3 в плоскости z = 150 мм (*б*) и результаты их ручного трассирования в данных блоках (*в*, *г*)

Когда горизонтальные напряжения S_{xx} максимальны, наблюдалась иная картина. В блоке 2 инициирование трещины произошло в наклонной скважине с выходом на его поверхность (рис. 6a, e).



Рис. 6. Трещины гидроразрыва на верхней границе блока 2 (*a*), в блоке 4 в плоскости z = 130 мм (δ) и результаты их ручного трассирования в данных блоках (*в*, *г*)

Кольцевые линии на боковой грани трехмерной модели на рис. 6 ϵ представляют собой визуальные артефакты, возникающие при сканировании. При разрыве блока 4 скважины соединились в единую систему лишь на небольшом удалении от точки пересечения, при этом "внешние" крылья трещины отклонились в сторону действия сжимающего напряжения S_{xx} (рис. 6 δ , ϵ).

В блоках пескобетона с добавлением угольной фракции угол γ между скважинами составлял 30°. Несмотря на преимущественное распространение трещин вдоль действия максимального напряжения S_{xx} , наблюдалось частичное соединение скважин продольным разрывом (рис. 7). В некоторых случаях это объединение происходило достаточно далеко от места пересечения скважин. Видно, что трещины в подобных блоках имеют более сложную структуру и могут сильно разветвляться в процессе роста.



Рис. 7. Трещины гидроразрыва на верхней границе блока 5 (*a*), в блоке 6 в плоскости z = 185 мм (б) и результаты их ручного трассирования в данных блоках (*e*, *z*)

выводы

В ходе лабораторных исследований процесса гидроразрыва искусственных блоков с длиной ребра 200 мм установлены особенности развития трещин в неоднородном поле напряжений. Рабочая жидкость подавалась в изолированную область, образованную двумя пересекающимися под углом γ скважинами, что моделировало выполнение гидроразрыва в системе "скважина – боковой ствол". В однородном поле сжатия такая схема нагрузки приводит к инициированию продольной трещины в плоскости, которая соединяет оси скважин вне зависимости от угла γ . Это подтверждается результатами численных исследований, проведенных ранее.

При наличии максимального напряжения S_{xx} , направленного перпендикулярно рассматриваемой плоскости, в крепких породах происходит образование трещины на стенках скважины по направлению действия данного напряжения. В блоках с добавлением угольной фракции наблюдается частичное соединение скважин продольным разрывом, в особенности, когда расхождение между ними все еще остается небольшим. Подобное можно объяснить наличием техногенной трещиноватости от бурения, более обширной микротрещиноватостью блоков с углем и его слабыми механическими свойствами. При этом в той области блока, где влияние наклонной скважины отсутствует, трещина распространяется по направлению действия максимального напряжения S_{xx} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Леконцев Ю. М., Сажин П. В., Новик А. В. Систематизация средств создания инициирующих щелей в скважинах, пройденных в породах угольных шахт // Уголь. 2020. № 12 С. 4–6.
- Sun Y., Fu Y., and Wang T. Field application of directional hydraulic fracturing technology for controlling thick hard roof: A case study, Arab. J. Geosci., 2021, Vol. 14, No. 438. — P. 1–15.
- Zhang F., Wang X., Bai J., Wu W., Wu B., and Wang G. Fixed-length roof cutting with vertical hydraulic fracture based on the stress shadow effect: A case study, Int. J. Min. Sci. Technol., 2022, Vol. 32, No. 2. P. 295–308.
- 4. Cha M., Alqahtani N. B., Yin X., Kneafsey T. J., Yao B., and Wu Y. S. Laboratory system for studying cryogenic thermal rock fracturing for well stimulation, J. Pet. Sci. Eng., 2017, Vol. 156. P. 780–789.
- 5. 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.
- 6. Chen J., Li X., Cao H., and Huang L. Experimental investigation of the influence of pulsating hydraulic fracturing on pre-existing fractures propagation in coal, J. Pet. Sci. Eng., 2020, Vol. 189. 107040.
- Zhao X., Huang B., and Xu J. Experimental investigation on the characteristics of fractures initiation and propagation for gas fracturing by using air as fracturing fluid under true triaxial stresses, Fuel, 2019, Vol. 236. — P. 1496–1504.
- 8. 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.
- Ishida T., Chen Q., Mizuta Y., and Roegiers J. C. Influence of fluid viscosity on the hydraulic fracturing mechanism, J. Energy Resour. Technol., 2004, Vol. 126, No. 3. — P. 190–200.
- Zheng K., Liu Y., Zhang T., and Zhu J. Mining-induced stress control by advanced hydraulic fracking under a thick hard roof for top coal caving method: A case study in the Shendong mining area, China, Miner., 2021, Vol. 11. — 1405.
- 11. 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.
- 12. Ge Z., Cao S., Lu Y., and Gao F. Fracture mechanism and damage characteristics of coal subjected to a water jet under different triaxial stress conditions, J. Pet. Sci. Eng., 2022, Vol. 208. 109157.
- Fu H., Zhang F., Weng D., Liu Y. et al. The simulation method research of hydraulic fracture initiation with perforations, Proceedings of IFEDC 2018, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, 2018. — P. 1229–1240.
- Lu W. and He C. Numerical simulation of the fracture propagation of linear collaborative directional hydraulic fracturing controlled by pre-slotted guide and fracturing boreholes, Eng. Fract. Mech., 2020, Vol. 235. — 107128.
- 15. Cheng Y., Lu Y., Ge Z., Cheng L., Zheng J., and Zhang W. Experimental study on crack propagation control and mechanism analysis of directional hydraulic fracturing, Fuel, 2018, Vol. 218. P. 316–324.
- **16.** Карасев Ю. Г., Бакка Н. Т. Природный камень. Добыча блочного и стенового камня. СПб.: СПбГИ, 1997. 428 с.
- 17. Пат. 2186969 РФ. Способ разрушения горных пород (приоритет от 20.02.2001) / Н. Г. Кю, А. В. Новик, Д. С. Симонов, А. М. Фрейдин // Опубл. в БИ. 2002. № 22.
- 18. Патутин А. В., Азаров А. В., Рыбалкин Л. А., Дробчик А. Н., Сердюков С. В. Устойчивость развития трещины гидроразрыва между двумя параллельными скважинами // ФТПРПИ. — 2022. — № 2. — С. 34–44.

- **19.** Patutin A. V., Martynyuk P. A., and Serdyukov S. V. Numerical studies of coal bed fracturing for effective methane drainage, J. Siberian Federal University, Eng. and Technol., 2013, Vol. 6, No. 1. P. 75–82.
- 20. Пат. 2730688 РФ. Способ направленного гидроразрыва угольного пласта (приоритет от 09.12.2019)
 / С. В. Сердюков, А. В. Патутин, А. В. Азаров, Л. А. Рыбалкин, Т. В. Шилова // Опубл. в БИ. 2020. № 24.
- 21. 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.
- 22. Zuo S., Ge Z., Deng K., Zheng J., and Wang H. Fracture initiation pressure and failure modes of tree-type hydraulic fracturing in gas-bearing coal seams, J. Nat. Gas Sci. Eng., 2020, Vol. 77. 103260.
- 23. Рубцова Е. В. Стенд трехосного независимого нагружения для физического моделирования процесса измерительного гидроразрыва // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 2. № 3. С. 211–215.
- 24. Рубцова Е. В., Скулкин А. А. О физическом моделировании процесса измерительного гидроразрыва в модельных образцах при их неравнокомпонентном нагружении // Проблемы недропользования. — 2017. — № 2 (13). — С. 42–46.
- **25.** Leontiev A. and Rubtsova E. Analysis of crack formation in model specimens during hydraulic fracturing in holes, Trigger Effects in Geosystems, The 5th Int. Conf., 2019. P. 247–256.
- 26. Кривощеков С. Н., Кочнев А. А. Опыт применения рентгеновской компьютерной томографии для изучения свойств горных пород // Вестн. ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. Т. 12. № 6. С. 32–42.
- 27. Guo T., Zhang S., Qu Z., Zhou T., Xiao Y., and Gao J. Experimental study of hydraulic fracturing for shale by stimulated reservoir volume, Fuel, 2014, Vol. 128. P. 373–380.

Поступила в редакцию 02/XII 2022 После доработки 13/III 2023 Принята к публикации 16/III 2023