



**РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГИДРОРАЗРЫВА  
КРУПНОРАЗМЕРНЫХ ОБРАЗЦОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ**

**А. В. Патутин, Л. А. Рыбалкин, А. Н. Дробчик**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
E-mail: andrey.patutin@gmail.com, leonid.rybalkin@gmail.com, valker.tiamant@mail.ru,  
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Рассмотрены основные особенности лабораторной установки для моделирования гидравлического разрыва в крупноразмерных кубических моделях с независимым трехосным нагружением, а также прототипы скважинных устройств для его осуществления. Испытательная камера установки является разборной, что позволяет организовать простой доступ к образцу после окончания исследований. Разработана конструкция устройства разрыва с нажимными герметизаторами и регулируемым межпакерным интервалом для создания продольных и поперечных трещин. Проведены испытания трех вариантов несъемных скважинных устройств, установленных в блок из пескобетона при его заливке.

*Гидравлический разрыв, трещина, лабораторная установка, физическое моделирование, устройство разрыва*

**DEVELOPMENT OF A TOOL FOR HYDRAULIC FRACTURING  
OF LARGE-SIZED SAMPLES IN LABORATORY CONDITIONS**

**A. V. Patutin, L. A. Rybalkin, and A. N. Drobchik**

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: andrey.patutin@gmail.com, leonid.rybalkin@gmail.com, valker.tiamant@mail.ru,  
Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The paper presents main features of a laboratory setup for modeling hydraulic fracturing in large-sized cubic samples with independent triaxial loading and prototypes of downhole tools for its implementation. The test cell of the setup is demountable, which allows for easy access to the sample after the end of the experiment. The design of a fracturing tool with compression packers and adjustable interpacker interval for creating longitudinal and transverse cracks has been developed. Three variants of non-removable fracturing tools installed in a sandcrete block during its pouring have been tested.

*Hydraulic fracturing, crack, laboratory setup, physical modeling, fracturing tool*

Траектория распространения трещины гидроразрыва в горной породе зависит от многих факторов, но в большинстве случаев доминирующими являются величина и направление действия сжимающих напряжений. На значительных глубинах, характерных для разработки традиционных и трудноизвлекаемых месторождений нефти и газа, возможная ориентация трещин ограничена высокими вертикальными напряжениями, что приводит к образованию продольного разрыва в случае вертикальной скважины, либо радиальных поперечных трещин при множественном гидроразрыве горизонтального ствола.

Иная ситуация складывается в случае проведения гидроразрыва в шахтных условиях при добыче твердых полезных ископаемых, например, при контролируемой посадке труднообрушаемой кровли и разупрочнении породных прослоек [1–3], предварительной дегазации угольных пластов [4, 5], защитном экранировании выработок от флюидопритока [6], подземном выщелачивании [7], измерении напряжений [8–10]. Гидроразрывы осуществляют вблизи горных выработок и других пластовых скважин, влияющих на напряженно-деформированное состояние пород и фильтрацию рабочей жидкости; часто область вокруг выработок содержит техногенную трещиноватость. Это приводит к сложнопредсказуемым траекториям трещин по сравнению с традиционным гидроразрывом, осуществляемым в нефтегазовых коллекторах.

Лабораторные исследования процесса распространения разрыва в образцах горных пород в условиях сжатия помогают повысить эффективность метода. В большинстве случаев для этого используются установки испытания керн с двумя независимыми направлениями нагрузки (осевое и всестороннее сжатие) [11–13], что не полностью соответствует пластовым условиям и не позволяет рассматривать специфические задачи горного дела.

Для получения достоверных результатов физического моделирования ГРП необходимо использовать установки с независимым трехосным нагружением. При этом размер образца должен быть достаточно большим, чтобы можно было пренебречь влиянием краевых эффектов от его границ на траекторию разрыва. К тому же в таком образце можно создать модель выработки или расположить дополнительные скважины.

В данной работе рассмотрены некоторые технические особенности разработанной установки для исследования процесса гидроразрыва в кубических образцах горной породы со стороной ребра 420 мм в неоднородном поле напряжений, а также прототипы скважинных устройств для его осуществления. Следует отметить, что в мире известно лишь несколько подобных стендов с возможностью независимого трехосного нагружения моделей с линейным размером 300 мм и выше [14].

**Технические особенности установки независимого трехосного нагружения.** В состав лабораторной установки для исследования процесса гидроразрыва входят:

- 1) камера трехосного сжатия модели с двумя гидравлическими домкратами, позволяющими выполнять нагружение в двух горизонтальных направлениях;
- 2) станина стенда с датчиками деформации и гидравлическим домкратом, позволяющим выполнять нагружение модели в вертикальном направлении;
- 3) насосы и пневмогидроаккумуляторы (ПГА) для работы домкратов и нагнетания рабочей жидкости в модель породного массива через скважины;
- 4) датчики и измерительная аппаратура для регистрации давлений в гидравлических линиях, деформаций и сейсмоакустической эмиссии.

Лабораторная установка представляет собой станину 1 с четырьмя вертикальными направляющими, на которых смонтированы детали испытательной камеры, изготовленные из толстых листов высокоуглеродистой стали (рис. 1). Камера имеет разборную конструкцию без сварных и винтовых соединений. Это позволяет после окончания испытаний получить свободный доступ к модели без механических воздействий на нее, что важно для контроля формы образовавшейся трещины. Более детальное описание составных частей лабораторной установки приведено в [15]. Количество и форма плит оптимизированы по результатам расчетов напряженно-деформированного состояния при максимальном сжатии модели 8 домкратами 9. Максимальные горизонтальные смещения, возникающие в плитах силового контура при распределенной нагрузке 2.5 МН, приложенной к стенкам короба, составляют 0.13 мм. Фотографии крупноразмерного образца в испытательной камере и смонтированных плит силового контура показаны на рис. 2.

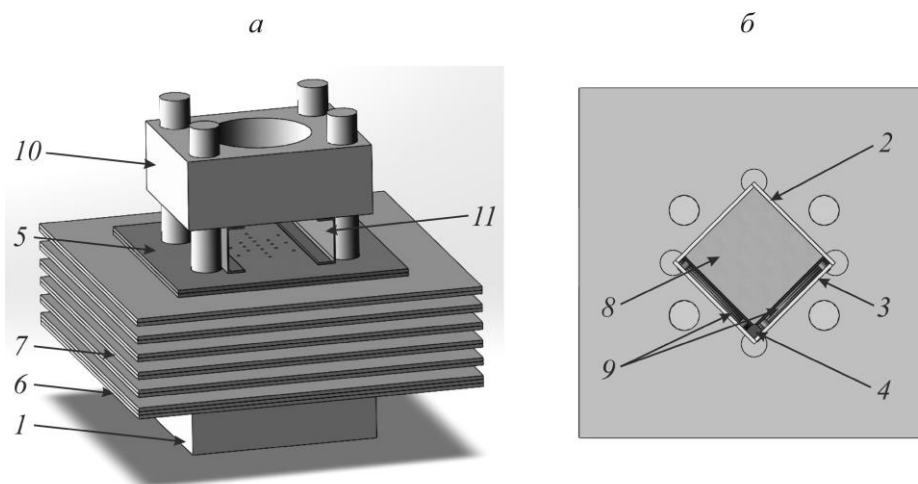


Рис. 1. Общий вид лабораторного стенда (а) и горизонтальное сечение в области центральных плит силового контура (б): 1 — станина с вертикальными направляющими; 2, 3 — короб испытательной камеры; 4 — угловая вставка; 5 — верхняя опорная плита; 6 — нижняя опорная плита; 7 — плиты силового контура; 8 — модель породного массива; 9 — плоские гидравлические домкраты горизонтального нагружения модели; 10 — крышка станины; 11 — швеллер

Гидравлическое оборудование установки состоит из двух систем, одна из которых обеспечивает сжатие модели, другая — подачу рабочей жидкости под давлением в скважины для выполнения гидродинамических воздействий. Стабилизация внешних сжимающих напряжений при деформировании и разрыве модели осуществляется с помощью ПГА, подсоединенных к домкратам бокового и вертикального силового нагружения. В рамках тестовых испытаний гидравлических систем проводилось независимое трехосное обжатие образца до величины 15 МПа.



Рис. 2. Фотографии крупноразмерного образца в испытательной камере (а) и смонтированных плит силового контура (б)

**Разработка устройства гидроразрыва.** При выполнении гидроразрыва в необсаженных скважинах изолирование интервала воздействия возможно двумя путями: использование нажимных (надувных) пакеров, либо создание непроницаемых пробок с помощью цемента или быстротвердеющих смол. К преимуществам первого способа относится относительная простота реализации при наличии соответствующего оборудования и возможность проводить множественный гидроразрыв в одной скважине. При этом эффективно перекрыть интервал разрыва пакерами удастся только в относительно крепких породах с хорошо выдержанным номинальным диаметром скважины. Использование непроницаемых пробок решает проблему большой измен-

чивости диаметра скважины и осыпания ее стенок, однако такой подход имеет значительные ограничения по решаемым задачам, так как пробка является несъемной и может мешать дальнейшим технологическим процессам. Отметим, что распределения напряжений вблизи пробки и расширяемого пакера различны, что может влиять на траекторию формируемых трещин. При проведении лабораторных исследований чаще используют несъемные устройства, которые либо “вклеиваются” в пробуренную скважину с помощью смол, либо помещаются в искусственный блок непосредственно при его заливке.

В ходе экспериментальных работ испытаны три несъемных устройства, которые были установлены в блок из пескобетона марки М300 в процессе его заливки. Диаметр устройств составлял 12 мм, длина 150 мм; у двух из них была резьба М12×1.5 различной длины. На третьем устройстве вырезан паз глубиной 0.5 мм с шагом 10 мм (рис. 3).

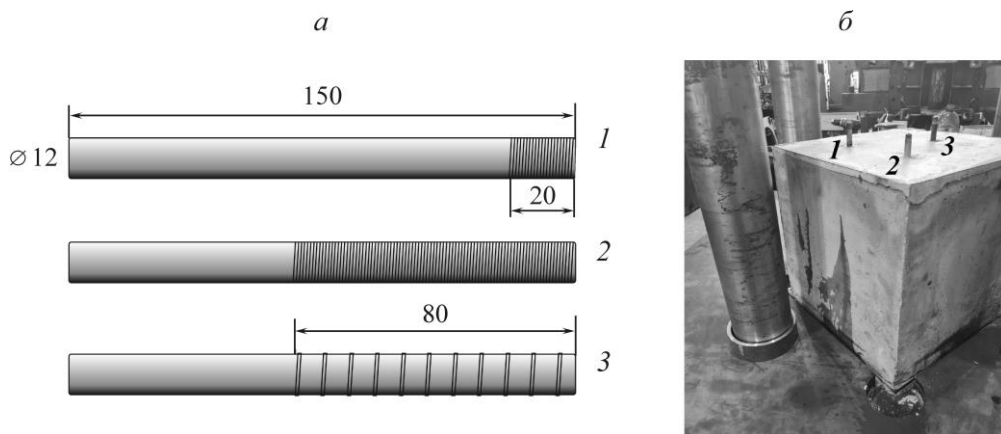


Рис. 3. Характерные особенности используемых устройств (а) и фотография образца после проведения гидроразрыва (б)

Результаты испытаний показали, что все три варианта устройств позволяют создавать трещины гидроразрыва при закачке рабочей жидкости, обеспечивая высокое качество герметизации. Выход трещин на поверхность образца свидетельствует о том, что все они направлены вдоль оси устройств, установленных в блоке. Давления разрыва и запираения трещин приведены в таблице.

Давление разрыва и запираения трещины для различных скважинных устройств

Номер устройства	Давление разрыва, МПа	Давление запираения трещины, МПа
1	20	5
2	21	5
3	31	6

Для тех случаев, когда необходимо иметь свободный доступ в скважину после эксперимента, предложена конструкция устройства с нажимными пакерами и регулируемым межпакерным расстоянием, что позволяет обеспечивать условия формирования продольных и поперечных трещин (рис. 4).

Устройство гидроразрыва состоит из пакеров 1, 2, регулирующей трубки 3, нажимной трубки 4, силового стержня 5 с внутренним каналом. Регулирующая трубка выполнена в двух вариантах, исходя из условия формирования продольных и поперечных трещин, которое связывает длину межпакерного интервала  $L$  и диаметр скважины  $d$  [16, 17]: при  $L < 2d$  образуется поперечная трещина, при  $L > 4d$  — продольная.

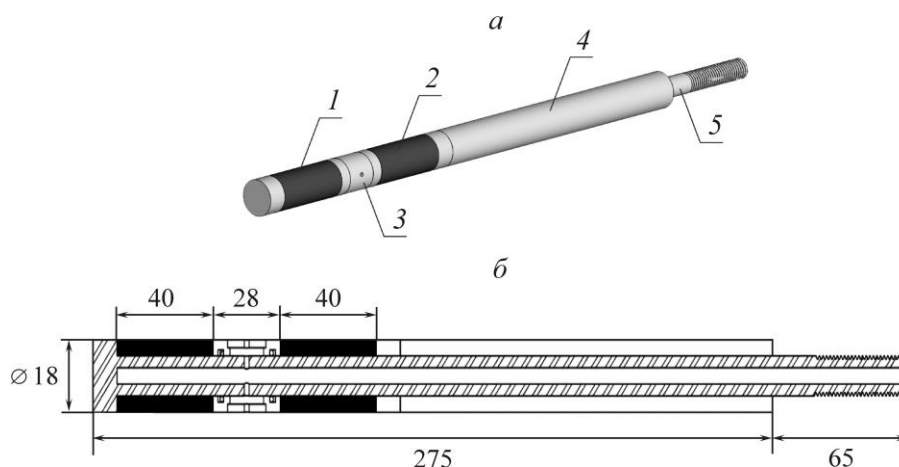


Рис. 4. 3D модель устройства гидроразрыва (а) и его общий вид (б): 1, 2 — пакеры; 3 — регулирующая трубка; 4 — нажимная трубка; 5 — силовой стержень с внутренним каналом

При выполнении эксперимента в блоке, установленном в испытательной камере, бурится скважина, причем ее местоположение должно совпадать с одним из отверстий на верхней опорной плите 5 (рис. 1). Затем в скважину помещается устройство, и блок перекрывается опорной плитой. Диаметр отверстий совпадает с диаметром силового стержня, он выходит за пределы испытательной камеры, а нажимная трубка упирается в опорную плиту снизу. Затяжка гайки по наружной резьбе силового стержня вызывает сжатие пакеров и герметизации заданного интервала скважины. После этого через канал силового стержня в межпакерный интервал подается жидкость разрыва, что приводит к формированию трещины.

#### ВЫВОДЫ

Представленная лабораторная установка позволяет исследовать траектории трещин гидроразрыва при независимом трехосном нагружении. Использование относительно больших кубических образцов расширяет круг решаемых задач. Например, могут быть рассмотрены вопросы взаимодействия нескольких трещин гидравлического разрыва пласта, созданных последовательно или одновременно. Другое возможное направление исследований связано с влиянием подземных выработок на распространение трещин.

Проверена работоспособность системы сжатия физической модели. Трехосное сжатие образца проводилось до 15 МПа. Предложена конструкция устройства с нажимными пакерами и регулируемым межпакерным расстоянием для обеспечения условий формирования продольных и поперечных трещин. Испытаны три различных несъемных скважинных устройства для гидроразрыва, установленных в блок из пескобетона при его заливке; определены давления разрыва и запираения трещин. Результаты испытаний показали, что все три варианта устройств позволяют создавать трещины гидроразрыва при закачке рабочей жидкости, обеспечивая высокое качество герметизации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Liu J., Liu C., Yao Q., and Si G. The position of hydraulic fracturing to initiate vertical fractures in hard hanging roof for stress relief, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, vol. 132, 104328.
2. Lekontsev Y. M. and Sazhin P. V. Directional hydraulic fracturing in difficult caving roof control and coal degassing, *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 914–917. [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.]

3. **Sun Y., Fu Y., and Wang T.** Field application of directional hydraulic fracturing technology for controlling thick hard roof: a case study, *Arabian Journal of Geosciences* volume, 2021, vol. 14, 438.
4. **Huang B. X., Huang C. M., Cheng Q. Y., Huang C. H. and Xue W. C.** Hydraulic fracturing technology for improving permeability in gas-bearing coal seams in underground coal mines, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2012, vol. 112, no. 6, pp. 485–495.
5. **Li Q., Lu Y., Ge Z., Zhou Z., Zheng J., and Xiao S.** A new tree-type fracturing method for stimulating coal seam gas reservoirs, *Energies*, 2017, vol. 10, no. 9, 1388.
6. **Shilova T., Patutin A. and Serdyukov S.** Sealing quality increasing of coal seam gas drainage wells by barrier screening method, *International GeoConference SGEM*, 2013, vol. 1, pp. 701–708.
7. **Sinclair L. and Thompson J.** In situ leaching of copper: Challenges and future prospects, *Hydrometallurgy*, 2015, vol. 157, pp. 306–324.
8. **Puller J. W., Mills K. W., Jeffrey R. G., and Walker R. J.** In-situ stress measurements and stress change monitoring to monitor overburden caving behaviour and hydraulic fracture pre-conditioning, *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, vol. 26, no. 1, pp. 103–110.
9. **Serdyukov S. V., Kurlenya M. V., and Patutin A. V.** Hydraulic fracturing for in situ stress measurement, *Journal of Mining Science*, 2016, vol. 52, no. 6, pp. 1031–1038. [Сердюков С. В., Курленя М. В., Патутин А. В. К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 6–14.]
10. **Rubtsova E. V. and Skulkin A. A.** Hydraulic fracturing stress measurement in underground salt rock mines at Upper Kama deposit, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 270–274. [Рубцова Е. В., Скулкин А. А. О выполнении измерительных гидроразрывов в соляных породах на подземных рудниках Верхнекамского месторождения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — Т. 7. — № 1. — С. 270–274.]
11. **Stephansson O., Semikova H., Zimmermann G., and Zang A.** Laboratory pulse test of hydraulic fracturing on granitic sample cores from Äspö HRL, Sweden *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2019, vol. 52, no. 2, pp. 629–633.
12. **Patel S. M., Sondergeld C. H., and Rai C. S.** Laboratory studies of hydraulic fracturing by cyclic injection, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, vol. 95, pp. 8–15.
13. **Konno Y., Jin Y., Yoneda J. et al.** Hydraulic fracturing in methane-hydrate-bearing sand, *RSC advances*, 2016, vol. 6, pp. 73148–73155.
14. **Patutin A. V. and Serdyukov S. V.** Laboratory stands for hydraulic fracturing simulation in a nonuniform stress field, *Fundamental and Applied Mining Science*, vol. 7, no. 1, pp. 117–123. [Патутин А. В., Сердюков С. В. Лабораторные стенды для моделирования гидроразрыва в неоднородном поле напряжений // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2020. — Т. 7. — № 1. — С. 117–123.]
15. **Serdyukov S. V., Rybalkin L. A., Drobchik A. N., Patutin A. V. and Shilova T. V.** Laboratory installation simulating a hydraulic fracturing of fractured rock mass, *Journal of Mining Science*, 2020, vol. 56, no. 6, pp. 1053–1060. [Сердюков С. В., Рыбалкин Л. А., Дробчик А. Н., Патутин А. В., Шилова Т. В. Лабораторный стенд для моделирования гидравлического разрыва массива трещиноватых пород // ФТПРПИ. — 2020. — № 6. — С. 193–201.]
16. **El Rabaa W.** Experimental study of hydraulic fracture geometry initiated from horizontal wells, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1989, Paper SPE-19720-MS.
17. **Soliman M. Y. and Boonen P.** Rock mechanics and stimulation aspects of horizontal wells, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2000, vol. 25, no. 3–4, pp. 187–204.