



**ЛАБОРАТОРНЫЕ СТЕНДЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОРАЗРЫВА
В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ**

А. В. Патутин, С. В. Сердюков

*Институт горного дела СО РАН, E-mail: andrey.patutin@gmail.com,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Рассмотрены возможности известных лабораторных установок для моделирования гидроразрыва в условиях истинно трехосного нагружения. Наибольший интерес вызывают стенды, позволяющие создавать трещину в крупных образцах кубической формы с длиной ребра 200 мм и больше. В этом случае удастся снизить влияние краевых эффектов от границ образца на траекторию распространения разрыва. В обзор вошли результаты исследований, полученные с использованием 10 различных установок, расположенных в крупных научных центрах.

Гидравлический разрыв, истинно трехосное нагружение, лабораторный стенд, давление, напряженное состояние, трещина

**LABORATORY TEST FACILITIES FOR HYDRAULIC FRACTURING SIMULATION
IN A NONUNIFORM STRESS FIELD**

A. V. Patutin and S. V. Serdyukov

*Institute of Mining, Siberian branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: andrey.patutin@gmail.com, Krasnyi pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The paper considers the capabilities of well-known laboratory facilities for hydraulic fracturing simulation in conditions of true triaxial loading. Test facilities which allow creating a crack in large cubic samples with an edge length of 200 mm or more are of great interest. In this case, it is possible to reduce the influence of edge effects from sample boundaries on the propagation path of the fracture. This review includes research results obtained from 10 different facilities located in major scientific centers.

Hydraulic fracturing, true triaxial loading, laboratory stand, pressure, stress state, fracture

Важным элементом разработки успешной технологии гидравлического разрыва пласта (ГРП) являются лабораторные исследования формирования и распространения трещин в образцах горных пород в условиях сжатия. В большинстве случаев для этого используются установки, в которых цилиндрический образец подвергается нагружению вдоль оси и всестороннему обжатию по боковой поверхности, поэтому в ходе эксперимента нагрузка осуществляется только в двух независимых направлениях, что не полностью соответствует пластовым условиям. Известно, что ориентация трещины гидроразрыва сильно зависит от поля действующих напряжений, следовательно для достоверного физического моделирования ГРП необходимо использовать независимое трехосное нагружение, а размер образца должен быть достаточно большим, чтобы можно было пренебречь влиянием краевых эффектов от его границ на траекторию разрыва.

В данной работе рассмотрены возможности известных лабораторных установок для моделирования гидроразрыва, позволяющих проводить исследования на образцах кубической формы с длиной ребра свыше 200 мм в неоднородном поле напряжений. Список установок и их основные характеристики приведены в таблице.

Лабораторные установки для исследования гидроразрыва в неоднородном поле напряжений

Организация (страна)	Размер образца, мм	Нагрузка, кН
ИГД СО РАН (Россия) [1–3]	200	100
Colorado School of Mines (США) [4–6]	200	1400
Chongqing University (Китай) [7]	200	6000
Tohoku University (Япония) [8]	200	400
Central South University (Китай) [9]	300	1000
China University of Mining and Technology (Китай) [10–12]	300–500	4000
China University of Petroleum (Китай) [13–16]	300	2300
Jilin University (Китай) [17]	300	5400
Wuhan University of Technology (Китай) [18]	300	3000
Research Institute of Petroleum Exploration and Development (Китай) [19]	762	40000

Эксперименты, выполняемые на крупногабаритных образцах, разнообразны. Например, в результате лабораторных испытаний, проводимых в Институте горного дела СО РАН (Россия, г. Новосибирск) установлено влияние конструктивных особенностей герметизирующих элементов на развитие трещины [2]. Для этого изготавливались макеты скважинных зондов с различной реализацией системы пакерования, в том числе с использованием составных пакерных элементов в виде полиуретановых цилиндров разной длины с разделительными металлическими вставками между ними. На основе экспериментальных данных выполнен сравнительный анализ методик вычисления давления заклинивания P_s , используемого при определении напряженного состояния горных пород методом ГРП. Показано, что давление разрыва и направление развития трещины зависит от формы забоя модельной скважины, наличия и направления нарезки иницирующих щелей на ее стенке, значения сжимающих напряжений [3].

В Колорадском высшем горнотехническом училище, США (Colorado School of Mines) проведена серия экспериментов по разрыву горных пород жидким азотом (рис. 1а) [4, 5]. Такая технология применяется для предотвращения быстрого снижения эксплуатационных характеристик нефтегазовых коллекторов после ГРП, а также уменьшения рисков загрязнения грунтовых вод. Испытания выполнялись на образцах сланца, песчаника и бетона в неоднородном поле напряжений; траектория распространения трещин регистрировалась с помощью акустических методов, визуального контроля и рентгеновской компьютерной томографии. Установлено, что при создании трещин с помощью жидкого азота снижение давления разрыва составляло около 40 % по сравнению с разрывом газообразным азотом. Отмечается, что в ходе экспериментов в образцах не наблюдалось обширного трещинообразования за счет фазового перехода азота, поэтому при необходимости формирования более протяженных трещин следует увеличивать давление закачки. В образцах сланца после ГРП наблюдалось повышение проницаемости до 300 %, при этом каждый повторный цикл закачки приводил все к большему росту проницаемости, связанному не только с образованием новых трещин, но и увеличением раскрытия старых.

Разработанная в Чунцинском университете, Китай (Chongqing University) лабораторная установка позволяет исследовать деформации образца, определять его проницаемость и моделировать гидравлический разрыв при нагрузках до 6000 кН (рис. 1б) [7]. Максимальное давление закачки рабочей жидкости составляет 60 МПа. Результаты исследований проницаемости образцов сланца показали ее значительное падение (до 91 %) при увеличении сжимающих давлений с 10 до 60 МПа. При проведении гидроразрыва образцов установлено преимущественное направление развития трещин и его зависимость от величины действующих нагрузок.

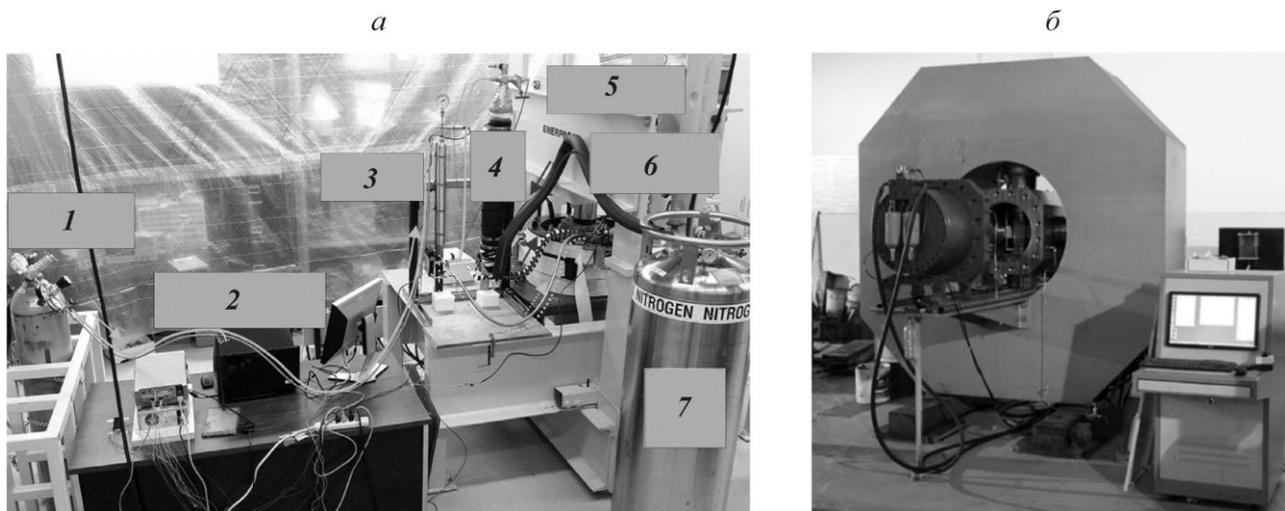


Рис. 1. Установки для исследования процесса гидроразрыва в Колорадском высшем горнотехническом училище (а) и Чунцинском университете (б) [5, 7]: 1 — сжатый воздух; 2 — система сбора данных; 3 — газовый аккумулятор; 4 — жидкий азот 1 л; 5 — гидравлический пресс (вертикальная нагрузка); 6 — трехосные приводы и контейнер для образца; 7 — жидкий азот

Исследования в Университете Тохоку, Япония (Tohoku University) проводились на искусственных образцах с заданными свойствами (рис. 2а) [8]. Для создания матрицы образцов использовалась смесь кварцевого песка и каолинита в пропорции 10 : 1, при этом прослойки создавались из чистого каолинита. После проведения гидроразрыва визуальными методами исследовалось распространение трещины и распределение рабочей жидкости в образце. Установлено, что трещина стремится расти в горизонтальной плоскости по границе двух слоев, что может быть связано с низкой сжимающей вертикальной нагрузкой при проведении эксперимента.

Увеличение размера образца до 300 мм и выше накладывает дополнительные конструктивные требования на разрабатываемые стенды. В Центральном южном университете, Китай (Central South University) создана лабораторная установка, позволяющая выполнять гидравлический разрыв за счет подачи переменного потока рабочей жидкости с заданными параметрами [9]. Эксперимент проводился на естественных и искусственных образцах угля. В результате выполнения исследований авторами предложена технология пульсирующего гидроразрыва с изменяющейся частотой подачи рабочей жидкости, основные особенности которой заключаются в двухэтапной закачке. До создания основной трещины закачка происходит в импульсном режиме впрыска с контролем давления, что позволяет снизить давление разрыва, а также способствует масштабному развитию микротрещин вблизи ствола скважины. После формирования разрыва закачка ведется с регулируемым расходом для контроля объема создаваемой трещины, при этом частота пульсации может менять для достижения максимального эффекта.

Обширная программа исследований процесса гидроразрыва осуществляется в Китайском университете горного дела и технологии (China University of Mining and Technology). Например, в результате лабораторных испытаний изучены особенности развития трещины ГРП в образцах с предварительным разрушением. Для этого перед проведением гидроразрыва в модели скважины, созданной в образце и заполненной водой, выполняли микровзрыв [10]. В результате, при сравнении итогов ГРП предварительно разрушенных образцов и тех образцов, которые не были подвержены такому разрушению, наблюдались значительные различия. Так, в предварительно разрушенных образцах при микровзрыве формируется обширная система дополнительных трещин в окрестности скважины, и дальнейшее проведение ГРП создает в образце до 8 плоскостей разрушения, в отличие от одной трещины в образцах без предварительного разрушения.

Лабораторный эксперимент по одновременному проведению гидроразрыва в нескольких скважинах, расположенных на одной линии, показал следующие результаты [11]. Использовались крупные образцы кубической формы с длиной ребра 500 мм, выполненные из бетона. В процессе исследований установлены основные особенности образования и распространения трещин. При образовании трещин наблюдались следующие варианты: формирование единой магистральной трещины, соединяющей все скважины; совместное образование магистральной трещины и трещин в направлении, перпендикулярном к направлению действия минимального сжимающего напряжения σ_3 ; образование трещин только в направлении, перпендикулярном к направлению действия σ_3 .

Отдельная серия экспериментов посвящалась проведению разрыва искусственных образцов воздухом высокого давления [12]. Полученные результаты сравнивались с результатами стандартного ГРП водой. Скорости закачки при этом составляли 25 л/мин для воздуха и 400 мл/мин для воды. Установлено, что диаграммы “давление – время”, энергия акустической эмиссии и характер распространения трещины для двух различных энергоносителей существенно отличаются. Показано, что при разрыве воздухом регистрируются повышенные значения энергии акустической эмиссии, а длина формируемых трещин меньше, чем при разрыве образца водой. Фотография используемой для проведения данных экспериментов лабораторной установки приведена на рис. 2б.

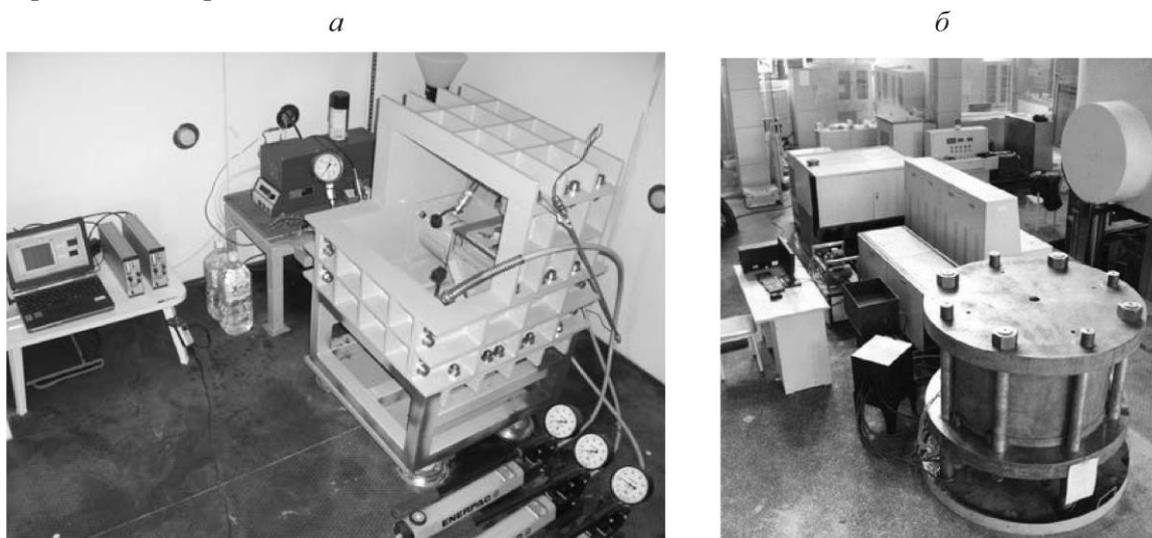


Рис. 2. Установки для исследования процесса гидроразрыва в Университете Тохоку (а) и Китайском университете горного дела и технологии (б) [8, 11]

Результаты испытаний образцов, полученные с помощью лабораторной установки Китайского нефтяного университета (China University of Petroleum), в большей степени применимы к решению актуальных задач нефтегазового сектора. В ходе экспериментов изучалось влияние напряженного состояния, соотношения горизонтальных напряжений, темпов закачки и вязкости рабочей жидкости на направление и характер распространения трещин в сланцах [13]. Для исследования сложной структуры образованных микротрещин и контроля конечной траектории основной трещины применялась рентгеновская компьютерная томография. Влияние искусственной и естественной трещиноватости на развитие трещин ГРП изучалось в [14], причем система искусственных трещин создавалась за счет нагревания и охлаждения образцов.

В другом эксперименте гидроразрыву подвергались образцы сланца с четко выделенной слоистостью, причем для этого использовались жидкости разрыва с различной вязкостью, а также диоксид углерода в сверхкритическом состоянии [15]. Установлено, что при высоких

вертикальных напряжениях трещина пересекает горизонтальную слоистость, а ее отклонения в сторону напластования наблюдаются при снижении вертикального сжатия образца. Это согласуется с теоретическими данными. Использование более вязких рабочих жидкостей и высоких скоростей закачки предпочтительней для создания одной главной трещины, в противном случае возможно возникновение дополнительных трещин и ответвлений. При проведении разрыва диоксидом углерода его использование ведет к формированию широкой сети трещин в образце, что является благоприятным фактором для решения некоторых задач.

Результаты некоторых исследований могут использоваться при разработке эффективных технологий добычи метана угольных пластов [16]. При проведении лабораторных экспериментов на шести образцах, изготовленных из натурального антрацита и искусственных пород, представляющих подошву и кровлю, установлено, что наличие естественной трещиноватости и величина действующих напряжений являются определяющими факторами для направления развития разрыва. Благодаря полученным данным запланирована корректировка темпов закачки рабочей жидкости на метанугольном месторождении в провинции Чанчжи с целью предотвращения излишнего трещинообразования вне угольного пласта.

На лабораторной установке, разработанной в Цзилиньском университете, Китай (Jilin University) проведена серия экспериментов по разрушению гранитных блоков с их нагревом до 150 °С [17]. Основной задачей исследований являлось определение особенностей распространения разрыва при росте скорости закачки рабочей жидкости. Согласно результатам скорость закачки влияет на геометрию и направление развития трещины, а также на количество создаваемых микротрещин вблизи скважины.

Лабораторный стенд в Уханьском технологическом университете, Китай (Wuhan University of Technology) использовался для проведения экспериментов на крупных блоках угля (рис. 3а) [18]. Отмечается, что на траекторию разрыва значительное влияние оказывают значения максимального и минимального горизонтальных напряжений. В случае, когда эти напряжения близки, то геометрия трещины сложна и не имеет четкой направленности. Также в ходе испытаний установлено влияние скорости закачки на направление распространения основного разрыва и развитие дополнительной сетки трещин.



Рис. 3. Установки для исследования процесса гидроразрыва в Уханьском технологическом университете (а) и Научно-исследовательском институте по разведке и разработке нефти (б) [18, 19]

Стенд для моделирования гидроразрыва на образцах особо крупного размера разработан в Научно-исследовательском институте по разведке и разработке нефти, Китай (Research Institute of Petroleum Exploration and Development) (рис. 3б) [19]. Размер образцов составляет 762×762×914 мм, давление рабочей жидкости — до 69 МПа, темп закачки — до 10 л/мин. При

моделировании пластовых условий давление на стенке образца может достигать 69 МПа. Подобные параметры лабораторной установки позволяют получать уникальные данные, которые могут быть использованы для совершенствования технологии гидроразрыва. Например, результаты исследований процесса перфорации позволили разработать новый способ инициирования трещины, при этом регистрируемое давление разрыва значительно ниже, чем при использовании стандартных перфорационных отверстий.

ВЫВОДЫ

Анализ известных лабораторных исследований гидроразрыва показал, что существует не так много установок, позволяющих проводить эксперименты в крупных образцах кубической формы в условиях неоднородного трехосного нагружения. Большинство из них созданы для проведения испытаний в образцах с длиной ребра до 300 мм, при этом практически всегда гидроразрыв осуществляется в единичной скважине, что не позволяет изучать вопросы взаимодействия нескольких трещин при синхронном или поэтапном разрыве системы скважин. Установки с возможностью испытаний образцов размером более 300 мм единичны и используются для решения специфических вопросов, например, для определения особенностей зарождения и роста трещин при наличии перфорации различной направленности и глубины, что имеет большое практическое значение.

Очевидно, что увеличение размеров образца позволяет обозначить целый ряд новых направлений исследований. В крупном образце возможно создание искусственных неоднородностей с заданными свойствами, расклиненных пропантом трещин, изолированных полостей, заполненных жидкостью или газом и прочих включений, что позволит изучать влияние таких структур на траекторию разрыва. Результаты подобных исследований могут быть применены для решения актуальных задач горного дела, связанных с повышением эффективности шахтного ГРП для интенсификации дегазации углепородного массива, созданием разрывов вблизи существующих неоднородностей в пласте, защитой горных выработок от выхода в них естественных и искусственных трещин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Rubtsova E. V.** Three-axial independent loading bench for physical modeling of hydraulic fracturing for stress measurement, Interexpo Geo-Siberia, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 211–215. (in Russian). [**Рубцова Е. В.** Стенд трехосного независимого нагружения для физического моделирования процесса измерительного гидроразрыва // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2015. — Т. 2. — № 3. — С. 180–187.]
2. **Rubtsova E. V. and Skulkin A. A.** Physical simulation the process of measurement hydrofracturing in specimen under their non-equicomponent loading, Subsoil use problems, 2017, no. 2 (13), pp. 42–46. (in Russian) [**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.]
3. **Leontiev A. and Rubtsova E.** Analysis of crack formation in model specimens during hydraulic fracturing in holes, Trigger Effects in Geosystems, The 5th International Conference, 2019, pp. 247–256.
4. **Alqatahni N. B., Cha M., Yao B., Yin X. et al.** Experimental investigation of cryogenic fracturing of rock specimens under true triaxial confining stresses, SPE Europec featured at 78th EAGE conference and exhibition, 2016, SPE-180071-MS.
5. **Cha M., Alqahtani N. B., Yin X., Kneafsey T. J. et al.** Laboratory system for studying cryogenic thermal rock fracturing for well stimulation, J. Pet. Sci. Eng., 2017, vol. 156, pp. 780–789.
6. **Frash L. P., Gutierrez M., and Hampton J.** True-triaxial apparatus for simulation of hydraulically fractured multi-borehole hot dry rock reservoirs, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, vol. 70, pp. 496–506.

7. **Li M., Yin G., Xu J., Li W. et al.** A novel true triaxial apparatus to study the geomechanical and fluid flow aspects of energy exploitations in geological formations, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, vol. 49, no 12, pp. 4647–4659.
8. **Ito T., Igarashi A., Suzuki K., Nagakubo S. et al.** Laboratory study of hydraulic fracturing behavior in unconsolidated sands for methane hydrate production, *Offshore Technology Conference*, 2008, OTC-19324–MS.
9. **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, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 189, 107040.
10. **Huang B., Li P., Ma J., and Chen S.** Experimental investigation on the basic law of hydraulic fracturing after water pressure control blasting, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, vol. 47, no. 4, pp. 1321–1334.
11. **Liu J., Liu C., and Yao Q.** Mechanisms of crack initiation and propagation in dense linear multihole directional hydraulic fracturing, *Shock Vib*, 2019, 7953813.
12. **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, pp. 1496–1504.
13. **Guo T., Zhang S., Qu Z., Zhou T. et al.** Experimental study of hydraulic fracturing for shale by stimulated reservoir volume, *Fuel*, 2014, vol. 128, pp. 373–380.
14. **Zhou J., Jin Y., and Chen M.** Experimental investigation of hydraulic fracturing in random naturally fractured blocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, vol. 47, no. 7, pp. 1193–1199.
15. **Wang J., Guo Y., Zhang K., Ren G., and Ni J.** Experimental investigation on hydraulic fractures in the layered shale formation, *Geofluids*, 2019, vol. 2019, 4621038.
16. **Liu J., Yao Y., Liu D., Xu L. et al.** Experimental simulation of the hydraulic fracture propagation in an anthracite coal reservoir in the southern Qinshui basin, China, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 168, pp. 400–408.
17. **Cheng Y., and Zhang Y.** Experimental study of fracture propagation: the application in energy mining, *Energies*, 2020, vol. 13, no. 6, 1411.
18. **Jiang T., Zhang J., and Wu H.** Experimental and numerical study on hydraulic fracture propagation in coalbed methane reservoir, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 35, pp. 455–467.
19. **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, pp. 1229–1240.