

## НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 539.421

### ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА МАССИВА ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОД

С. В. Сердюков, Л. А. Рыбалкин, А. Н. Дробчик, А. В. Патутин, Т. В. Шилова

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
E-mail: ss3032@yandex.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Представлена методика изготовления и результаты испытаний синтетической слоисто-трещиноватой среды с заданной внутренней структурой, обладающей выраженной анизотропией свойств. Приведена конструкция лабораторного стенда для исследования гидравлического разрыва породного массива на крупноразмерных кубических моделях с независимым трехосным нагружением. Дано описание его гидравлического оборудования и измерительно-регистрирующей аппаратуры.

*Массив горных пород, гидравлический разрыв, физическое моделирование, слоисто-неоднородные среды, трещиноватые породы, механические и фильтрационные свойства, испытательная камера, гидравлическое оборудование, измерительно-регистрирующая аппаратура*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200618

Один из наиболее эффективных способов разрушения породного массива — образование в нем протяженных гидравлических разрывов путем подачи в скважины жидкости под высоким давлением. Этот способ лежит в основе многих существующих и разрабатываемых методов дезинтеграции и стимулирования флюидоотдачи горных пород, измерения их напряженно-состояния, формирования дренажных каналов и противofильтрационных завес в различных горно-геологических условиях [1–4]. Важный элемент создания и успешного применения таких технологий — физическое моделирование и тестирование процессов возникновения и распространения трещин.

Известно, что характер гидравлического разрыва зависит от напряженно-деформированного состояния пород, анизотропии их механических и фильтрационных свойств. В лабораторных экспериментах предпочтительно использовать реалистичные слоисто-неоднородные трещиноватые модели с независимым трехосным нагружением. Большинство известных стендов,

---

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-17-00087).

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

соответствующих этим требованиям, предназначено для проведения исследований на моделях кубической формы размером до 200 мм, что считается приемлемым для изучения образования трещин при выполнении разрыва в одиночной скважине, когда возмущение поля напряжений ограничено ее окрестностями. Этого достаточно для моделирования интенсификации извлечения нефти, но при добыче твердых полезных ископаемых разрывы осуществляют вблизи горных выработок и других скважин, влияющих на напряженно-деформированное состояние пород и фильтрацию флюидов. Достоверные результаты в этом случае можно получить только на крупноразмерных моделях.

В настоящее время в мире известно несколько установок с трехосным нагружением моделей с линейным размером 300 мм и выше (табл. 1) [5–11]. Во многих из них оболочка испытательной камеры выполнена из толстостенной трубы большого диаметра, что затрудняет синтез трехмерных систем наблюдения, используемых при контроле гидравлического разрыва, например, методом акустической эмиссионной томографии. Эксперименты проводят на однородных изотропных моделях, а иногда — на моделях, имеющих слоисто-неоднородное строение [11]. Трещиноватые материалы не применяют, несмотря на то что исследование траектории развития разрывов в них вызывает большой теоретический и практический интерес. Применение в этих целях природных сланцев не обеспечивает повторяемость опытов и ограничено образцами небольших размеров.

ТАБЛИЦА 1. Лабораторные установки для исследования гидравлического разрыва в неоднородном поле напряжений

Организация, страна	Размер образца, мм	Максимальная нагрузка, МН
Central South University, Китай	300	1.0
China University of Mining and Technology, Китай	300–500	2.0–4.0
China University of Petroleum, Китай	300	2.3
Jilin University, Китай	300	5.4
Wuhan University of Technology, Китай	300	3.0
Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Китай	762	40.0
Tohoku University, Япония	300	4.0

Для решения данной проблемы разработана методика синтеза слоисто-трещиноватой среды с заданной регулярной внутренней структурой, обладающей выраженной анизотропией свойств. В настоящей работе приведены результаты механических и фильтрационных испытаний опытных образцов такой среды. Рассмотрена конструкция стенда для исследования гидравлического разрыва породного массива на крупноразмерных кубических моделях с трехосным нагружением, дано описание его гидравлического оборудования и измерительно-регистрающей аппаратуры.

#### ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД

В состав лабораторного стенда входят:

- физическая модель трещиноватого породного массива;
- камера трехосного сжатия модели со встроенными гидравлическими домкратами нагружения в двух горизонтальных направлениях;

- станина стенда с датчиками деформации и гидравлическим домкратом нагружения модели породного массива в вертикальном направлении;
- гидравлическое оборудование для приведения в действие домкратов и нагнетания рабочей жидкости в скважины с системой измерения давлений;
- аппаратура для регистрации сейсмоакустической эмиссии;
- ультразвуковое оборудование для определения формы полученного разрыва.

*Физическая модель трещиноватого породного массива* представляет собой куб с длиной ребра 420 мм, изготовленный путем последовательной заливки слоев тонкодисперсных материалов на цементной основе. Поверхности слоев после затвердевания обрабатываются гидрофобным аэрозолем. Покрытие наносят в один или несколько приемов через трафареты с заданной геометрией и расположением обрабатываемых участков, что позволяет синтезировать слоисто-трещиноватые среды с регулярной внутренней структурой. Аэрозоль образует на поверхности пор, расположенных у границ раздела слоев, водоотталкивающее покрытие, которое уменьшает диаметр пор, сохраняя их газопроницаемость. Это обеспечивает возможность фильтрации газа в направлении, ортогональном слоистости. Гидрофобные участки препятствуют сцеплению между прослойками, формируя на границах раздела тонкие трещины.

На рис. 1а приведена фотография керна, выбуренного из готовой модели, а также примеры схем нанесения покрытия при создании сред с различной анизотропией проницаемости вдоль напластования.

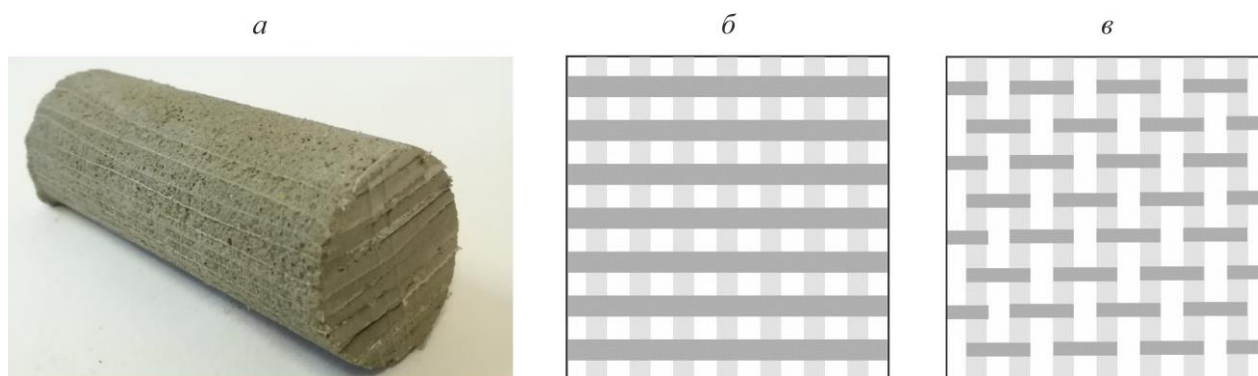


Рис. 1. Слоисто-трещиноватая среда: а — керна диаметром 30 мм; б, в — схемы нанесения гидрофобного покрытия при создании сред с низкой и высокой анизотропией проницаемости вдоль напластования (серым цветом выделены участки поэтапного нанесения покрытия)

На рис. 2 показаны фотографии механических испытаний кернов, выбуренных из готовой модели трещиноватого породного массива вдоль и поперек слоистости, демонстрирующие особенности деформирования и разрушения синтезированной среды. Видно, что при одноосном сжатии образцов вдоль напластования происходит расслаивание по границам раздела слоев (рис. 2а). При выбурировании керна поперек слоистости и нагружении по бразильской схеме наблюдается его дискование (рис. 2в). Такое поведение характерно для пород с выраженной доминантной системой трещин, например сланцев и углей, моделирование гидроразрыва которых представляет интерес для тестирования и развития технологий интенсификации извлечения метана.



Рис. 2. Механические испытания кернов, выбуренных из модели, изготовленной по схеме рис. 1б: а, б — одноосное сжатие вдоль и поперек напластования соответственно; в — испытания керна, выбуренного поперек слоистости, по схеме бразильского теста

Сводные результаты механических испытаний образцов синтезированной слоисто-трещиноватой среды даны в табл. 2. Отношение модулей упругости вдоль и поперек слоистости составляет 1.28, что соответствует диапазону коэффициентов анизотропии упругости 1.1–2.0, характерному для большинства слоистых пород [12].

ТАБЛИЦА 2. Результаты механических испытаний образцов синтезированной слоисто-трещиноватой среды

Тип образца	Одноосное сжатие		Растяжение (бразильский тест)		
	Прочность, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Прочность, МПа	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град
Вдоль слоистости	12.1	0.948	3.2	3.3	36.5
Поперек слоистости	12.0	0.742	4.7	3.9	26.2

На рис. 3 показаны зависимости анизотропной газопроницаемости синтезированной среды от всестороннего сжатия образцов, построенные по результатам фильтрационных тестов, выполненных на лабораторной установке, описанной в [13].

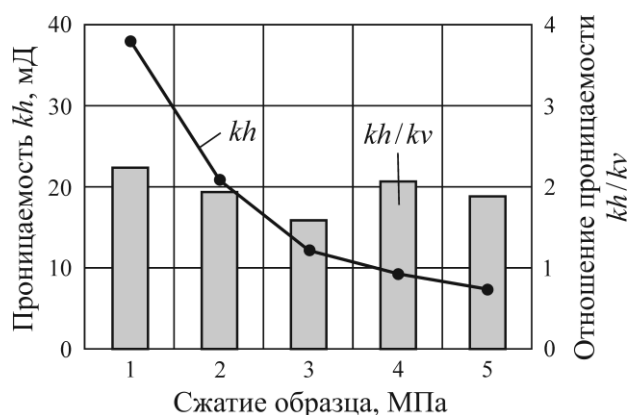


Рис. 3. Зависимости среднего коэффициента проницаемости модельной среды вдоль слоистости  $kh$  и его отношения к среднему коэффициенту проницаемости поперек слоев  $kv$  от гидростатического сжатия при градиенте давления фильтрации 3–6 МПа/м

Найдено, что отношение проницаемостей вдоль и поперек напластования тестируемого материала в исследованном диапазоне нагрузок 1–5 МПа составляет 1.59–2.34, что близко к свойствам слоистых песчаников, для которых этот показатель при гидростатическом сжатии 5 МПа равен 1.75 [14]. Таким образом, разработанная технология изготовления физических моделей обеспечивает получение сред, механические и фильтрационные свойства которых соответствуют слоисто-трещиноватым породам.

Лабораторный стенд представляет собой станину 1 с четырьмя вертикальными направляющими, на которых смонтированы детали испытательной камеры, изготовленные лазерной резкой из толстых листов высокоуглеродистой стали (рис. 4а, б).

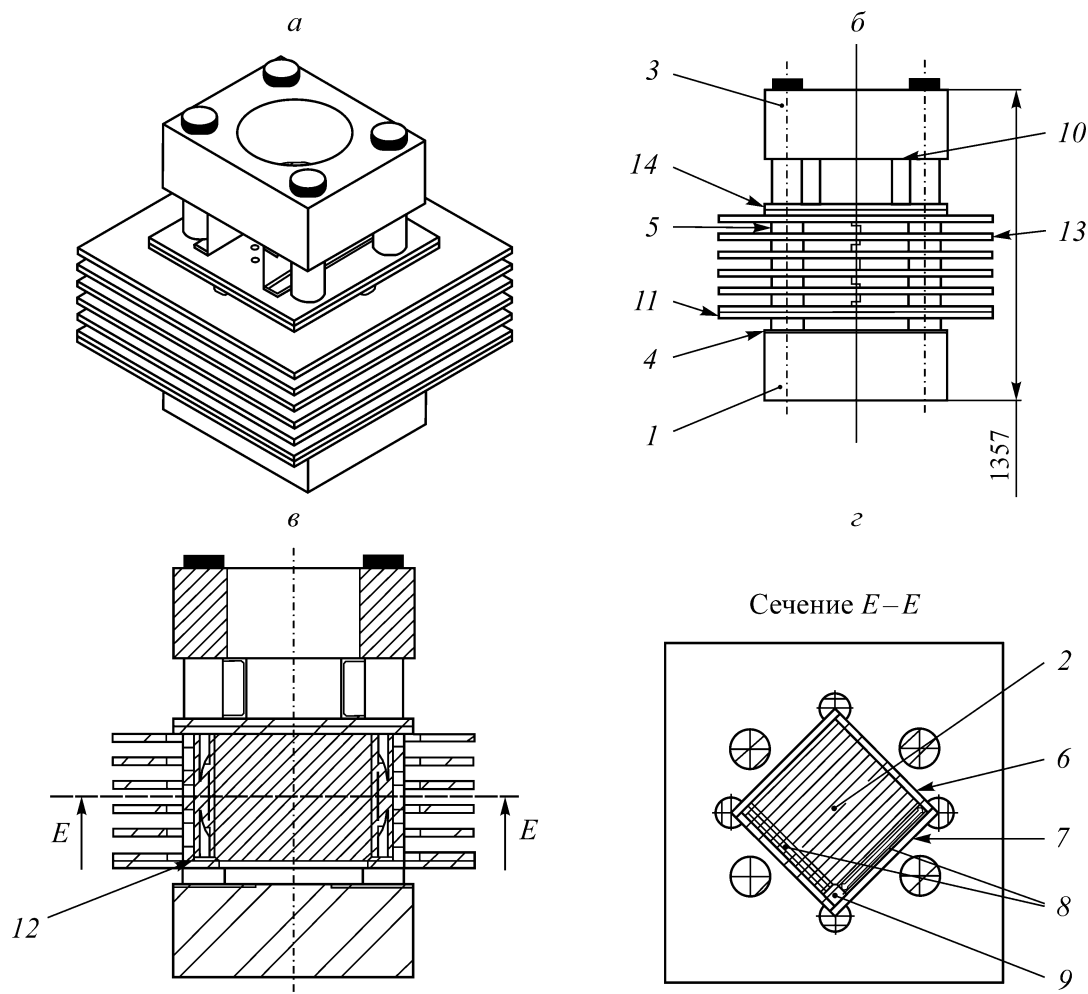


Рис. 4. Лабораторный стенд: а — общий вид; б — вид сбоку; в — центральное вертикальное сечение; г — центральное горизонтальное сечение: 1 — станина с вертикальными направляющими; 2 — модель породного массива; 3 — крышка станины; 4 — основание; 5 — втулки; 6, 7 — короб испытательной камеры; 8 — плоские гидравлические домкраты горизонтального нагружения модели; 9 — угловая вставка; 10 — швеллеры; 11 — нижняя опорная плита; 12 — втулки; 13 — плиты силового контура; 14 — верхняя опорная плита

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 методом ультразвуковой дефектоскопии. Камера состоит из прямоугольного короба 6, 7; угловой вставки 9; верх-

ней 14 и нижней 11 опорных плит; силового контура, собранного из плит 13, разнесенных вдоль направляющих станины втулками 5 и 12 (рис. 4в, з). Внутри короба установлена модель породного массива 2 и два плоских гидравлических домкрата 8 размерами  $410 \times 410 \times 40$  мм, развивающие рабочее усилие 2 МН (максимально 2.5 МН) при ходе до 15 мм. Короб камеры помещен в силовой контур, состоящий из квадратных плит 13 размером  $1500 \times 1500$  мм (рис. 4б). Количество, расположение и форма плит 13 оптимизированы по результатам расчетов в программной среде ABAQUS напряженно-деформированного состояния при максимальном нагружении домкратами 8.

Верхняя опорная плита содержит отверстия для бурения в модели скважин, подводки гидравлических линий для проведения гидродинамических воздействий, установки на поверхности модели различных измерительных датчиков с организацией линейных и площадных приемных антенн. Доступ к датчикам и скважинам обеспечивает свободное пространство, образуемое швеллерами 10 и отверстием большого диаметра в крышке станины 3.

Нижняя опорная плита 11 содержит квадратный вырез, в котором вертикально перемещается жесткий штамп размером  $410 \times 410 \times 32$  мм, приводимый в действие гидравлическим прессом, расположенным между штампом и плитой основания 4, установленной на станине 1 (рис. 4б).

Крышка 3 закреплена на направляющих гайками. Конструкция станины рассчитана на максимальные вертикальные нагрузки до 10 МН. Монтаж и разборка испытательной камеры выполняется с помощью грузоподъемного устройства. Конструкция камеры позволяет оперативно вносить изменения в конфигурацию расположения измерительных датчиков, скважин, моделей горных выработок, что расширяет возможности экспериментальных исследований. По параметрам разработанный стенд соответствует мировому уровню в области лабораторных исследований гидравлического разрыва горных пород (табл. 1).

Гидравлическое оборудование стенда состоит из двух систем, одна из которых обеспечивает трехосное 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 гидравлических аккумуляторов, подсоединенных к домкратам бокового и вертикального силового нагружения.

Для нагнетания рабочей жидкости в модель породного массива используется двухканальная система с раздельной подачей жидкости, обеспечивающая выполнение гидравлических разрывов в следующих режимах:

- квазистатическое нагружение интервалов разрыва скважин с низкой скоростью подачи жидкости и малым или увеличенным до заданной величины упругим объемом гидросистемы;
- нагружение интервала разрыва скважин импульсом высокого давления с регулируемой скоростью подачи фиксированного объема жидкости.

Схема оборудования показана на рис. 5. Первый из указанных режимов реализуется следующим образом. Интервалы разрыва одной или нескольких скважин соединяют с ручным гидравлическим прессом  $C_1$  короткими стальными трубками проходным сечением 3 мм. Полученную гидросистему заполняют рабочей жидкостью и закрывают. Затем с помощью прессы  $C_1$  медленно повышают давление жидкости вплоть до разрыва среды. Образуется трещина минимального размера, определяемого малым упругим объемом гидросистемы, которая не достигает поверхности модели.

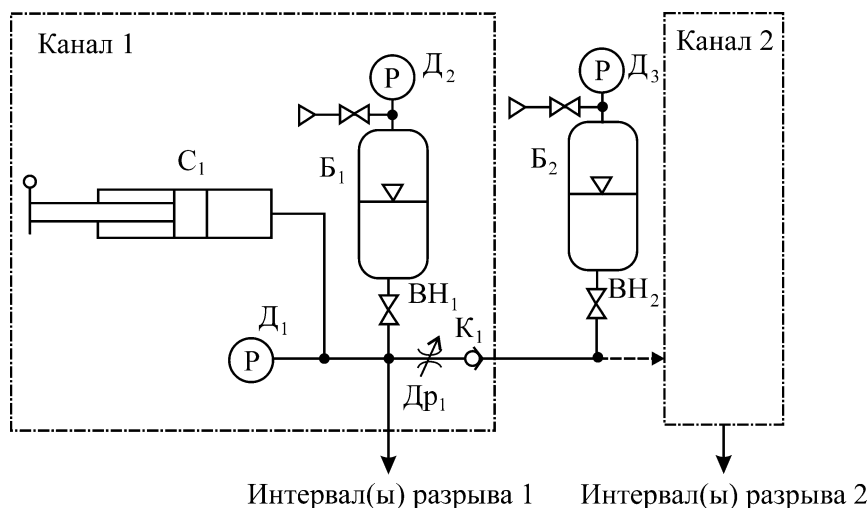


Рис. 5. Система гидравлического разрыва:  $C_1$  — ручной гидравлический пресс;  $D_1$ – $D_3$  — датчики давления;  $BH_1$ ,  $BH_2$  — вентили;  $K_1$  — обратный клапан;  $B_1$  — гидравлический аккумулятор регулирования упругого объема канала;  $B_2$  — гидравлический аккумулятор подачи импульса высокого давления;  $Dp_1$  — дроссель

Второй из режимов устанавливается подобно первому, но параллельно прессу подключается гидроаккумулятор  $B_1$ , газовый объем которого заряжен под давлением, равным минимальному сжимающему напряжению на границах модели. Задавая параметры гидроаккумулятора с учетом напряженного состояния модели и ожидаемого направления разрыва, можно регулировать размеры формируемой трещины.

Импульсный режим гидравлического разрыва осуществляется путем подсоединения гидравлического аккумулятора  $B_2$  к гидросистеме, предварительно заполненной жидкостью. Аккумулятор содержит заданное количество рабочей жидкости, дополнительно подаваемой в один или оба канала гидросистемы под давлением, превышающим ожидаемое давление разрыва среды.

В режиме с малым упругим объемом гидросистемы вентили  $BH_1$ ,  $BH_2$  закрыты; в импульсном — вентиль  $BH_1$  закрыт,  $BH_2$  открыт, дросселем  $Dp_1$  регулируются расход жидкости и скорость нарастания давления в интервале разрыва скважины. Используя синхронную или раздельную работу каналов 1 и 2, можно:

- проводить один или несколько гидравлических разрывов модели;
- формировать в импульсном режиме заданную последовательность разрывов в нескольких скважинах путем одновременной подачи в них жидкости с различным расходом;
- создавать в одном интервале скважины трещины в направлениях максимального и минимального сжатия среды (моделирование технологии двойного гидроразрыва);
- проводить разрывы в среде с заданным градиентом порового давления;
- выполнять прокачку жидкости через сформированные трещины с регистрацией генерируемого сейсмического излучения.

Гидравлическое оборудование стенда обеспечивает моделирование разнообразных технологий и режимов выполнения гидравлических разрывов в условиях неоднородности поля напряжений.

Измерительное оборудование стенда включает следующие системы:

- многоканальную низкочастотную аппаратуру контроля параметров гидродинамических воздействий, нагружения и деформации физической модели, эндогенного низкочастотного излучения среды в сейсмическом диапазоне;

- регистрирующую аппаратуру для наблюдений акустической эмиссии среды в процессе ее нагружения и разрушения;

- приборы неразрушающего контроля формы образовавшихся трещин.

При выполнении экспериментов измеряются и регистрируются следующие параметры:

- давление жидкости в домкратах (три измерительных канала);

- давление рабочей жидкости на выходах двухканальной системы гидравлического разрыва (два измерительных канала);

- давление газа в гидравлических аккумуляторах регулирования упругого объема гидросистемы и импульсной подачи рабочей жидкости (три измерительных канала);

- деформация модели по осям нагружения домкратами (три датчика линейных перемещений);

- трехкомпонентные сейсмические датчики на верхней и двух боковых поверхностях модели (девять измерительных каналов);

- вспомогательный канал записи сигнала синхронизации измерительного оборудования стенда.

Датчики давления выполнены по мостовой схеме и позволяют регистрировать переменное давление в диапазоне частот 0–1.5 кГц с разрешением не хуже 0.05 МПа. Точность измерений линейных перемещений составляет 0.1 мкм. Сейсмические геофоны принимают сигналы частотой 10–250 Гц с чувствительностью 80 В/(м/с).

Для измерения и регистрации акустической эмиссии используется 8-канальная аппаратура, приемники которой располагаются вдоль верхней и двух боковых поверхностях модели. Определение формы разрывов в базовом оснащении стенда выполняется с помощью ультразвукового дефектоскопа и георадара. Поскольку одно из планируемых направлений лабораторных исследований — тестирование и развитие методов дистанционного контроля гидродинамических процессов в породном массиве, в дальнейшем предполагается дооснастить стенд системами радиоволнового просвечивания и наблюдений электрического потенциала трещин, заполненных токопроводящей жидкостью [15].

## ВЫВОДЫ

Разработана технология синтеза анизотропных по проницаемости и упругим свойствам сред с заданной регулярной структурой, обеспечивающая физическое моделирование слоисто-трещиноватых горных пород. Создан лабораторный стенд для экспериментальных исследований гидравлического разрыва на крупноразмерных моделях породного массива в условиях трехосного сжатия. Оборудование стенда и размеры его испытательной камеры позволяют моделировать различные способы и режимы гидродинамических воздействий на породный массив, применяемые при разработке твердых полезных ископаемых, в том числе в окрестности горных выработок. Конструкция стенда позволяет оперативно изменять конфигурацию и состав измерительных средств, что важно при тестировании и оптимизации методов и систем дистанционного контроля гидродинамических процессов в породном массиве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.



2. Курленя М. В., Сердюков С. В., Патутин А. В., Шилова Т. В. Интенсификация подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 3–9.
3. 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.
4. Shilova T., Patutin A., and Serdyukov S. Sealing quality increasing of coal seam gas drainage wells by barrier screening method, Int. Multidiscip. Sci. GeoConf. SGEM, 2013, Vol. 1. — P. 701–708.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Cheng Y. and Zhang Y. Experimental study of fracture propagation: the application in energy mining, Energies, 2020, Vol. 13, No. 6. — 1411.
9. Jiang T., Zhang J., and Wu H. Experimental and numerical study on hydraulic fracture propagation in coalbed methane reservoir, J. Nat. Gas. Sci. Eng., 2016, Vol. 35. — P. 455–467.
10. Fu H., Zhang F., Weng D., Liu Y., Yan Y., Liang T., Guan B., Wang X., and Zheng W. The simulation method research of hydraulic fracture initiation with perforations, Proc. IFEDC 2018, Springer Ser. Geomech. Geoen., 2018. — P. 1229–1240.
11. Ito T., Igarashi A., Suzuki K., and Nagakubo S. Laboratory study of hydraulic fracturing behavior in unconsolidated sands for methane hydrate production, Offshore Technol. Conf., 2008, OTC-19324-MS.
12. Свойства горных пород. [https://www.tyuiu.ru/media/files/2009/12\\_03/file.2008-10-07.doc](https://www.tyuiu.ru/media/files/2009/12_03/file.2008-10-07.doc) (дата обращения: 18.10.2020 г.).
13. Сердюков С. В., Шилова Т. В., Дробчик А. Н. Лабораторная установка и методика определения газопроницаемости горных пород // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 172–180.
14. Рассохин С. Г. Анизотропия фильтрационных свойств горных пород и ее влияние на относительные фазовые проницаемости // Геология нефти и газа. — 2013. — № 3. — С. 53–56.
15. Ельцов И. Н., Мошкин Н. П., Шелухин В. В., Эпов М. И. Потенциал самополяризации вблизи трещины гидроразрыва пласта // ДАН. — 2016. — Т. 467. — № 2. — С. 211–215.

*Поступила в редакцию 18/X 2020*

*После доработки 25/X 2020*

*Принята к публикации 03/XI 2020*