

УДК 622.02:531

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.02.042

**Рубцова Екатерина Владимировна**

кандидат технических наук, доцент,  
старший научный сотрудник,  
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала  
СО РАН,  
630091 г. Новосибирск, Красный проспект, 54  
e-mail: [rubth@misd.ru](mailto:rubth@misd.ru)

**Rubtsova Ekaterina Vl.**

candidate of technical sciences,  
assistant professor, senior researcher,  
Chinakal Institute of Mining, SB RAS,  
630091 Novosibirsk, 54 Krasny prospect  
e-mail: [rubth@misd.ru](mailto:rubth@misd.ru)

**Скулкин Александр Александрович**

младший научный сотрудник,  
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала  
СО РАН  
e-mail: [chuptt@yandex.ru](mailto:chuptt@yandex.ru)

**Skulkin Alexander Al.**

junior researcher,  
Chinakal Institute of Mining, SB RAS  
e-mail: [chuptt@yandex.ru](mailto:chuptt@yandex.ru)

### **О ФИЗИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА В МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ ПРИ ИХ НЕРАВНОКОМПОНЕНТНОМ НАГРУЖЕНИИ**

### **PHYSICAL SIMULATION THE PROCESS OF MEASUREMENT HYDROFRACTURING IN SPECIMEN UNDER THEIR NON-EQUICOMPONENT LOADING**

#### *Аннотация:*

*Представлены конструкции стенда и макетов скважинных зондов для выполнения тестов измерительного гидроразрыва в модельных образцах размерами 200×200×200 мм при их независимом трехосном нагружении. По результатам физического моделирования на стенде дана сравнительная оценка методов косвенного определения величины давления «запирания» трещин гидроразрыва.*

#### *Abstract:*

*A test bench and experimental models of down hole surveying devices for test hydro-fracturing in specimen 200×200×200 mm in size under triaxial non-equicomponent loading are described. The methods of indirect estimation of shut-in pressure are compared based on physical simulation results.*

*Ключевые слова: измерительный гидроразрыв, стенд, макет, скважинный зонд, нагружение, трещина, диаграмма*

*Key words: measuring hydraulic fracturing, test bench, experimental model, down hole surveying device, loading, fracture, diagram*

Метод измерительного гидроразрыва применяется для экспериментальной оценки напряжений в массиве горных пород с конца 60-х годов двадцатого века. В ИГД СО РАН выполнен большой объем исследований, направленных на развитие метода и создание технических средств для его практической реализации [1, 2].

Исследование и обоснование методических и технологических подходов к выполнению тестов измерительного гидроразрыва может быть выполнено методом физического моделирования. Для этих целей в лаборатории горной информатики ИГД СО РАН в 2014 – 2015 гг. создан стенд (рис. 1), позволяющий производить гидроразрыв в модельных образцах размерами 200×200×200 мм при их трехосном независимом нагружении [3].

Для выполнения тестов гидроразрыва в образцах из полиметилметакрилата изготовлены макеты скважинных зондов с различными элементами системы пакеровки. Обоснованы вид и форма уплотнительных элементов для предотвращения эффекта «обгрызания» пакеров, т. е. проникновения рабочего флюида из межпакерной области (в процессе гидроразрыва) в зону контакта пакера со стенкой скважины и, возможно, за его пределы. В целях надежной герметизации участка скважины принято решение о целесообразности использования составных пакерных элементов в виде полиуретановых цилиндров с разделительными металлическими вставками между ними.

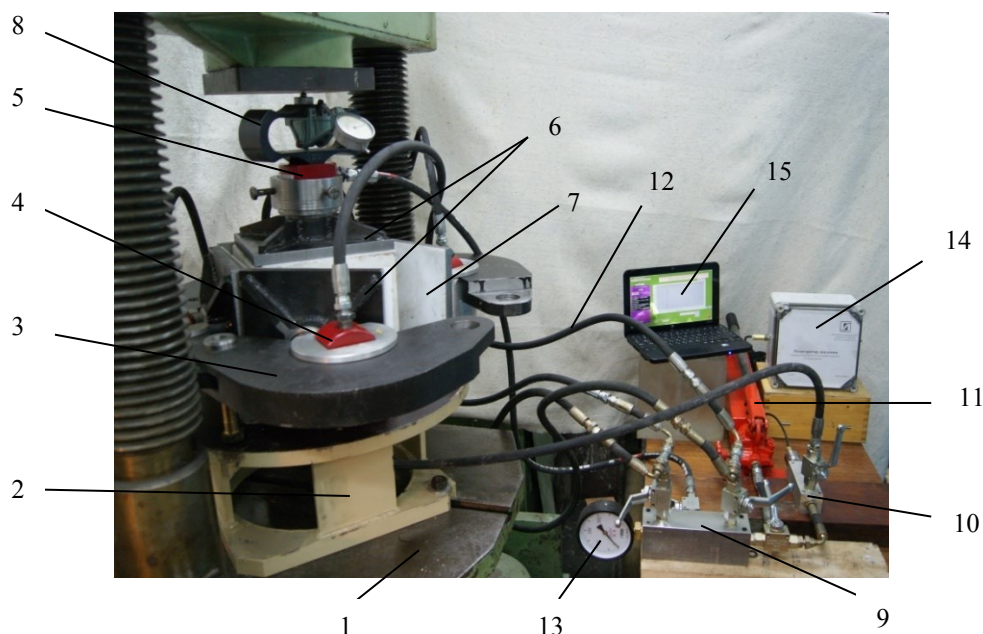


Рис. 1 – Стенд трехосного независимого нагружения:  
1 – плита прессы; 2 – подставка; 3 – рычаг; 4, 5 – гидравлические домкраты; 6 – опорные площадки;  
7 – прокладки из фторопласта; 8 – образцовый динамометр; 9, 10 – адаптеры;  
11 – насос; 12 – шланги высокого давления; 13 – манометр;  
14 – устройство преобразования и передачи данных; 15 – персональный компьютер

На рис. 2 представлена конструкция макета зонда в виде двух полиуретановых цилиндров длиной 1,5 и 2,0  $d$  ( $d$  – диаметр скважины в кубическом образце) и металлической шайбой между ними толщиной 0,7  $d$ ; для герметизации участка скважины применено осевое поджатие пакерной сборки.

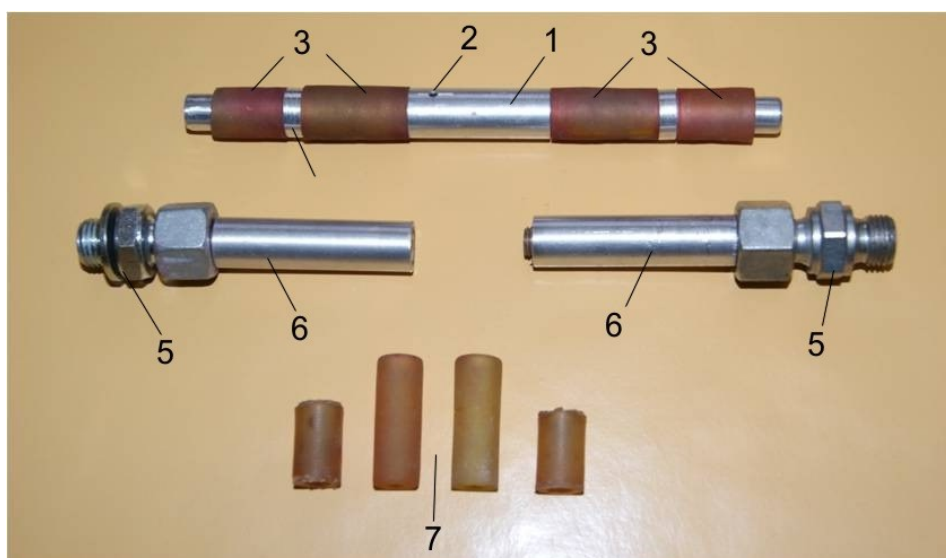


Рис. 2 – Макет зонда с составной конструкцией пакеров:  
1 – центральная втулка на корпусе зонда в сборе; 2 – отверстие для подачи флюида в межпакерное пространство; 3 – полиуретановые пакеры; 4 – металлическая втулка между пакерами;  
5 – концевые части зонда – переходники для соединения с напорной магистралью;  
6 – втулки для осевого поджатия пакеров; 7 – полиуретановые пакеры

При выполнении тестов гидроразрыва в скважинах с тупиковым забоем использована конструкция макета скважинного зонда, приведенная на рис. 3.



Рис. 3 – Макет зонда для скважины с тупиковым забоем

Программа физического моделирования на стенде предусматривает обоснование достоверности применяемых методов определения давления «запирания» трещины флюидоразрыва по экспериментальным диаграммам «давление – время»; отработку технологий образования инициирующей трещины и параметров гидроразрыва для получения направленных трещин при одноосном, двухосном и трехосном нагружении образцов; исследование возможностей контроля момента «смыкания» берегов трещины в процессе измерительного гидроразрыва.

На первом этапе проводилось исследование методов косвенного определения давления «запирания», соответствующего моменту равновесного состояния открытой трещины перед ее «схлопыванием». Точность определения этого параметра по экспериментальным диаграммам существенно влияет на достоверность оценки компонент главных напряжений, поскольку расчетное значение минимальной компоненты принимается равным давлению «запирания», а при расчете максимальной компоненты величина давления «запирания» умножается на коэффициент три, и, соответственно, также будет утрачиваться погрешность ее определения.

Для сравнительного анализа выбраны семь методов, которые практики гидроразрыва используют при обработке экспериментальных диаграмм [1, 4–6]:

I – «метод точки перегиба», заключается в проведении касательной к кривой спада давления на диаграмме «давление – время» сразу после прекращения подачи флюида и выборе значения давления запирания в точке, где кривая отклоняется от касательной;

(следующие четыре метода (II–V) аналогичны «методу точки перегиба», отличия заключаются в виде диаграмм, на которых выполняется построение касательной)

II – используется диаграмма « $P$  относительно  $\log \Delta t$ », где  $P$  – давление,  $\Delta t$  – интервал времени с момента начала спада кривой;

III – используется диаграмма « $\log P$  относительно  $\log \Delta t$ »;

IV – используется диаграмма « $P$  относительно  $\log (t + \Delta t) / \Delta t$ », где  $t$  – время нагнетания флюида;

V – используется диаграмма « $dP/dt$  относительно  $P$ »;

VI – метод, предложенный в ИГТМ АН УССР, при котором величина давления запирания определяется как величина стабилизировавшего давления на участке запирания;

VII – «метод биссектрисы», который заключается в проведении одной касательной к начальному участку кривой спада, второй касательной к участку стабилизации давления и построению биссектрисы угла пересечения двух касательных, величина давления запирания определяется в точке пересечения биссектрисы с кривой спада давления.

Выполнены две серии модельных экспериментов на образцах из полиметилметакрилата размерами 200×200×200 мм. Скважины в образцах при данной конструкции стенда ориентированы по вертикали, в двух образцах предварительно была создана зародышевая трещина по образующей скважине. Независимое нагружение на грани образцов задавалось от 3,0 до 5,5 тс. При этом соответствующие заданные компоненты напряжений в образцах составили от 0,76 до 1,52 МПа. Полученные методом физического моделирования гидроразрыва диаграммы были обработаны с использованием перечисленных выше методов. Результаты определения величины давления «запирания» приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Расчетная величина давления «запирания»**

Вид образца	Заданная минимальная компонента напряжений в образце, МПа	Величина давления «запирания», рассчитанная методами I - VII, МПа						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
Скважина без иницирующей щели	1,25	4,67	1,29	1,33	1,54	1,2	0,69	1,16
Скважина с иницирующей щелью	0,76	1,37	0,77	0,89	0,86	0,8	0,42	0,65

Как можно видеть, наиболее точные результаты (соответствие расчетного значения величины давления «запирания» заданной минимальной компоненте напряжений в образце) обеспечивают методы, основанные на использовании диаграмм « $P$  относительно  $\log \Delta t$ » (II) и « $dP/dt$  относительно  $P$ » (V). Погрешность определения давления «запирания» в этих случаях не превышает 5 %. Однако полученные результаты следует рассматривать как предварительные, ввиду ограниченного числа выполненных тестов гидроразрыва.

Для дальнейшего решения поставленных задач физического моделирования планируется дооснащение стенда высоконапорными трубопроводами (до 70 МПа), что позволит полностью реализовать возможности домкратов и выполнять тесты гидроразрыва при усилении воздействия на грани образцов до 10 тс. Результаты физического моделирования на стенде станут основой дальнейшего совершенствования разработанного в ИГД СО РАН измерительно-вычислительного комплекса «Гидроразрыв» [1], применяемого в настоящее время для оценки напряженного состояния горных пород в шахтных условиях.

**Литература**

1. Измерительно-вычислительный комплекс «Гидроразрыв» / А.В. Леонтьев, Е.В. Рубцова, Ю.М. Леконцев, В.Г. Качальский // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 1. – С. 104 - 110.
2. Рубцова Е.В. Развитие методических основ измерительного гидроразрыва / Е.В. Рубцова, А.А. Скулкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 5. – С. 188 - 191.
3. Рубцова Е.В. Стенд трехосного независимого нагружения для физического моделирования процесса измерительного гидроразрыва / Е.В. Рубцова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск: междунар.

науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. матер. в 3-х томах. Т. 3. – Новосибирск: СГУГиТ, 2015. – С. 211 - 216.

4. Aggson, J.R. Analysis of Hydraulic Fracturing Pressure Histories: A Comparison of Five Methods Used to Identify Shut-in Pressure / J.R. Aggson, K. Kim // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. – 1987. – Vol. 24. – № 1. – PP. 75-80.

5. Tunbridge, L.W. Technical Note-Interpretation of the Shut-In Pressure from the Rate of Pressure Decay // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. – 1989. – Vol. 26. – PP. 457-459.

6. Кулинич В.С. Теоретические и экспериментальные аспекты измерения напряжений в массиве горных пород гидравлическим разрывом / В.С. Кулинич // Исследования напряжений в горных породах: сб. науч трудов. – Новосибирск: Изд-во ИГД АН СССР, 1985. – С. 67 - 74.