

Некоторые результаты физического моделирования процесса гидроразрыва горных пород в лабораторных условиях

А. В. Леонтьев¹, Е. В. Рубцова^{1}, А. А. Скулкин¹*

¹ ФГБУН Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: rubth@misd.ru

Аннотация. Приводятся результаты физического моделирования процесса образования трещин при гидроразрыве стенок измерительных скважин. Опыты выполнялись на кубических образцах из полиметилметакрилата с гранями 200 мм. В образцах выполнялись сквозные либо тупиковые отверстия («скважины») диаметром 12 мм. В части «скважин» на заданных интервалах были нарезаны продольные и поперечные (кольцевые) щели глубиной до 3 мм, которые инициировали начало и направление процесса развития трещин разрыва. Гидроразрыв выполнялся с использованием макетов скважинных зондов, обеспечивающих герметизацию выбранного участка «скважины» (межпакерного интервала) и подачу в него под давлением рабочего флюида. Модельные образцы испытывались при различных схемах трехосного нагружения в специализированном стенде. Выполнен анализ характерных примеров развития трещин гидроразрыва в модельных образцах. Результаты физического моделирования могут быть использованы при постановке и решении аналитических задач в области измерительного гидроразрыва, а также в целях совершенствования технических средств и методических приемов использования данного метода контроля напряжений в условиях шахт и рудников.

Ключевые слова: гидроразрыв, модельный образец горной породы, измерительная скважина, инициирующая щель, макет зонда, стенд трехосного нагружения

Lab-scale simulation of hydraulic fracturing: some outcomes

A. V. Leontiev¹, E. V. Rubtsova^{1}, A. A. Skulkin¹*

¹ Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: rubth@misd.ru

Abstract. The paper describes the lab-scale physical simulation of hydraulic fracturing in measurement holes. The tests were carried out using cubical polymethyl methacrylate specimens with faces of 200 mm. The open-end or dead-end holes with diameter of 12 mm were made in the test specimens. In the preset intervals in the holes, the longitudinal or latitudinal (ring-wise) slots with depths up to 3 mm were precut to initiate and orient created fractures. Hydrofracturing was carried out using prototype tools for sealing a test interval in a hole (packer-to-packer spacing) and to feed it with power fluid under pressure. The model specimens were tested under different triaxial loading conditions on a special testing machine. The representative cases of the created fracture growth in the model specimens were analyzed. The physical simulation outcomes can be used in formulation and solution of analytical problems on HF stress measurement, as well as to improve procedures and equipment involved in this method of stress control in underground mines.

Keywords: hydraulic fracturing, rock specimen, measurement holes, initiation slot, borehole tool prototype, triaxial loading testing machine

В мировой практике геомеханических исследований значительная роль отводится экспериментальному определению напряжений, действующих в массиве горных пород, и их изменениям в процессе добычи полезных ископаемых. К настоящему времени предложено порядка двадцати методов контроля напряжений в натуральных условиях [1-6]. К числу наиболее активно развиваемых в последние годы относится метод измерительного гидроразрыва [7-17].

В теоретических и методических основах метода большое число исследований посвящено особенностям формирования и развития трещин разрыва [18 - 24]. Так, в частности, в работе [18] приведены результаты лабораторных экспериментов по определению влияния девиаторного локального напряжения на ориентацию трещин гидроразрыва в образцах из минеральной соли. Образцы имели призматическую форму и испытывались в силовой раме, которая позволяла нагружать их в пределах от 1 ед. (гидростатическое состояние) до 1.5. Установлено, что гидростатическое или негидростатическое состояние можно определить по форме трещины гидроразрыва.

При повышенном соотношении напряжений (>1.5) трещины прямолинейны и четко ориентированы. В случаях соотношений напряжений около единицы – трещины ориентированы произвольно и значительно ветвятся. Экспериментальные образцы из соли позволяют проводить тесты гидроразрыва при небольших прикладываемых нагрузках.

Для сравнения также был проведен эксперимент с использованием изотропного песчаника Беберталя. Лабораторные эксперименты выполнены при одноосном и трехосном нагружениях. Разрывы получены с использованием метода сухого разрыва (sleeve fracturing technique). В серии одноосных испытаний нагрузка варьировалась. Информация о характере распространения трещины и ее геометрии получали путем регистрации сигналов АЭ. Разрыв анизотропных пород приводит к получению сложной геометрии трещин. Обнаруживается существенное отклонение трещин от их траекторий в идеализированной модели, когда распространение разрушения происходит параллельно компоненте наибольших напряжений. Поперечно-изотропные породы, такие как сланец, могут быть смоделированы с учетом направленной анизотропии прочностных свойств, таких как вязкость разрушения. Разрушение скважины зависит не только от величины внешних напряжений, но и от их ориентации по отношению к анизотропии материала.

Результаты подобных экспериментов освещены также в [24]. Анализ формирования и развития сети трещин гидроразрыва сложной конфигурации выполнен в горизонтальной скважине с применением системы имитационного моделирования. Установлено, что основными механизмами формирования сложной конфигурации сети трещин гидроразрыва являются разветвление, переориентация, выход в плоскости напластования, слияние с природными трещинами или проникновение в слабые слои.

В настоящей работе представлены результаты физического моделирования процесса гидроразрыва сквозных и глухих «скважин», выполненных в кубических образцах (200*200*2000 мм) из оргстекла, при различных схемах их трех-

осного нагружения в специализированном стенде с использованием макетов скважинного зонда [25, 26]. Эксперименты проведены с целью получения сведений об ориентации, а также конфигурации трещин при типовых вариантах нагружения стенок «скважины» разрывным давлением, в том числе, когда на контуре «скважин» заранее выполнены инициирующие щели (пропилы).

Процедура подготовки и проведения экспериментов предусматривала последовательное выполнение следующих операций: изготовление модельного образца; образование в образце измерительных «скважин», ориентированных параллельно центральной оси одной из его граней; нарезание в отдельных «скважинах» продольных (длиной 30 мм) либо поперечных инициирующих щелей треугольной формы с углом 60° в вершине и глубиной 3 мм; размещение макета зонда в измерительной «скважине»; установку модельного образца в стенд; подключение макета зонда к системе управления экспериментом; силовое воздействие на образец путем подачи давления в гидравлические домкраты стенда; герметизацию интервала «скважины» и выполнение теста гидроразрыва с помощью макета зонда, подключенного к системе управления экспериментом. На рис. 1 приведен пример вида модельного образца после выполнения тестов гидроразрыва «скважин». Результаты физического моделирования представлены в таблице.



Рис 1. Модельный образец с трещинами гидроразрыв: 1-4 – номера «скважин»

Таблица

Описание схем экспериментов и результаты физического моделирования

Описание схемы эксперимента	Результат
<i>Модельные образцы в свободном состоянии</i>	
Глухая «скважина» с плоским забоем	Гидроразрыв при давлении 40 МПа. Трещина разрыва зародилась в углах плоского забоя и имеет круговую сферическую конфигурацию
Глухая «скважина» со сферическим забоем	При давлении в 53.0 МПа гидроразрыв не получен

Описание схемы эксперимента	Результат
Сквозная «скважина»	При использовании двухпакерного зонда получены односторонние трещины гидроразрыва произвольной направленности. Их конфигурация близка к прямоугольной форме. Трещины развиваются по образующей скважины и по ширине совпадают с длиной межпакерного интервала (см. рисунок)
<i>Модельные образцы в свободном состоянии. В «скважинах» созданы щели</i>	
Сквозная «скважина» с поперечной щелью в середине межпакерного интервала	Гидроразрыв произошел при давлении 22.3 МПа. Получена плоская круговая трещина диаметром 100 мм без выхода на свободную поверхность
Сквозная «скважина» с продольной щелью на контуре	Гидроразрыв произошел при давлении 28.0 МПа. Получена плоская односторонняя трещина, инициированная щелью в заданном направлении
Глухая «скважина» с плоским забоем и поперечной щелью возле забоя	Гидроразрыв произошел при давлении 17.3 МПа. Получена круговая слегка вогнутая в сторону верхней грани трещина
<i>Модельные образцы в нагруженном состоянии (S_h, S_H - усилия в горизонтальной плоскости; S_V – усилие по вертикальной оси). В «скважинах» созданы щели</i>	
Сквозная «скважина» с поперечной щелью в середине межпакерного интервала $S_h = S_H = 4.5$ тс $S_V = 6$ тс	Гидроразрыв произошел при давлении 17.0 МПа. Односторонняя трещина получила развитие в плоскости расположения скважины, приблизительно под углом 30^0 к вертикальной оси; поперечная щель не повлияла на ее ориентацию
Сквозная «скважина» с продольной щелью на контуре $S_h = S_H = 3.0$ тс $S_V = 6.5$ тс	Гидроразрыв произошел при давлении 15 МПа. Односторонняя трещина получила развитие в плоскости расположения скважины, по направлению заданному продольной щелью
Сквозная «скважина» с поперечной щелью в середине межпакерного интервала $S_H = 6.5$ тс $S_h = 2.5$ тс $S_V = 3.0$ тс	Гидроразрыв произошел при давлении 22.0 МПа. Получена круговая трещина, инициированная зародышевой щелью в нормальной по отношению к оси скважины плоскости
Сквозная «скважина» с продольной щелью на контуре $S_H = 6.0$ тс $S_h = S_V = 4.0$ тс	Гидроразрыв произошел при давлении 20 МПа. Трещина получила развитие в плоскости расположения продольной щели по направлению приложенного максимального усилия
Сквозная «скважина» с продольной щелью на контуре $S_V = 10$ тс	Трещина разрыва зародилась в области продольной щели и далее развернулась по направлению приложенного усилия
<i>Гидроразрыв вязким флюидом (пластилин). Модельные образцы в нагруженном состоянии. В «скважинах» созданы щели</i>	

Описание схемы эксперимента	Результат
Глухая «скважина» со сферическим забоем и поперечной щелью в середине межпакерного интервала $S_h = S_H = 3$ тс $S_V = 10$ тс	Двусторонняя плоская трещина разрыва возникла по образующей «скважины» в случайном месте и получила преимущественное развитие в направлении максимального приложенного усилия. Наличие щели не повлияло на ее ориентацию
Глухая «скважина» со сферическим забоем и продольной щелью на контуре $S_h = S_H = 3$ тс $S_V = 6.0$ тс	Получена симметричная плоская трещина разрыва, инициированная продольной щелью с тенденцией разворота в сторону максимального приложенного усилия

Заключение

Полученный экспериментальный материал представляет канонический ряд сведений, отражающих характер возникновения и особенности развития трещин гидроразрыва при различных напряженно-деформированных состояниях модельных образцов, а также при наличии продольных и поперечных инициирующих щелей на стенках «скважин». Анализ характерных примеров развития трещин гидроразрыва в модельных образцах показал, что продольный гидроразрыв стенок скважины имеет, как правило, одностороннюю направленность по отношению к оси измерительной скважины. При этом наличие на поверхности скважин инициирующих щелей не всегда обеспечивает заданное направление их развития. Результаты физического моделирования могут быть использованы при постановке и решении аналитических задач в области измерительного гидроразрыва, а также в целях совершенствования технических средств и методических приемов использования данного метода контроля напряжений в условиях шахт и рудников.

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 121062200075-4).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. International Society for Rock Mechanics. Suggested Methods for rock stress determination. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – Vol. 24 – No. 1 – (1987). – pp. 53 – 73.
2. Леонтьев А.В., Попов С.Н. Опыт практического применения измерительного гидроразрыва. М: Горный журнал. –2003. – № 3. – С. 37-43.
3. Obert I. In situ determinations of stress in rock // Min. Eng. - 1962. - V.13. – No.8. - pp. 51-58.
4. Leeman E.R. Rock stress measurements using the stress relieving technique // Mine and Quarry. Eng. – (1964). – V.30.6. – pp. 250-255.
5. Proceedings 5th (Melbourne, 1983), 6th (Montreal, 1987), 7th (Aachen, 1991) International Congresses on Rock Mechanics. Rock Stress and Rock Stress Measurements // Proceedings of an International Symposium. - Stockholm. - 1986.
6. Витке В. Механика скальных пород. // М: – Недра. – 1984.
7. Haimson B.C. The hydrofracturing stress measuring method and recent field result // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – Geomech. Abstr. – Vol. 15. – No. 4. – 1978. – P. 167 – 178.

8. Zoback M.D. and Haimson B.C. Hydraulic Fracturing Stress Measurement. // National Academy Press – Washington – 1983, – 270 pp.
9. Haimson B.C. Hydraulic Fracturing Stress Measurement. // Special Volume of the Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 1989 – 289 pp.
10. Haimson B.C. Hydraulic Fracturing Stress Measurement The hydraulic fracturing method of stress measurement: theory and practice. // Comprehensive rock engineering. – Vol. 3. – Oxford: Pergamon Press. – 1993. P. 395 – 412.
11. ASTM Annual Book of Standards test method for the determination of the in situ stress using hydraulic fracturing method (designation D 4645 - 87). American Society for testing and Materials. – Section 4. – Vol. 04.08. – 1989. – pp. 851 – 860.
12. Mizuta Y., Sano O., Ogino S., Raton H., Three Dimensional Stress Determination by Hydraulic Fracturing for Underground Excavation Design. // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – Geomech. Abst. . – Vol. 24. – No. 1. – 1987. – P. 15 – 29.
13. Haimson B.C., Cornet F.H., ISRM Suggested Methods for rock stress estimation – Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre – existing fractures (HTPF). // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – Vol. 40. – 2003. – pp. 1011 – 1020.
14. Cornet F.H. Valette B. In Situ Stress Determination From Hydraulic Injection Data. // Journal of Geophysical Research. – Vol. 89. – No. B13. – 1984. – pp. 11.527 – 11.537.
15. Stephansson O. Sleeve fracturing for Rock stress measurement in boreholes / Proc. Int. Symp. Essais en Place, in Situ Testing – Paris. – 1983. – Vol, 2. – pp. 571 – 578.
16. Сердюков С.В., Курленя М.В., Патутин А.В.: К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // ФТПРПИ. – 2016. – № 6 – С. 1–10.
17. Азаров А.В., Курленя М.В., Сердюков С.В., Патутин А.В. Особенности развития трещины гидроразрыва вблизи свободной поверхности в изотропной среде // ФТПРПИ. – 2019. – № 1. – С. 3-11.
18. Doe T.W., Boyce G. Orientation of Hydraulic Fractures in Salt Under Hydrostatic and Non-Hydrostatic Stresses. // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – Vol 26. – No 6. – 1989. – pp. 605 – 611.
19. Abqu – Sayed A., Brichtel C. and Clifton R. In Situ Stress Determination by Hydrofracturing: a Fracture Mechanics Approach. // J. Geophys. Res. – No 83. – 1978. – pp. 2851 – 2862.
20. Rummel F. Fracture mechanics approach to hydraulic fracturing stress measurements. // Fracture Mechanics of Rock. – Academic Press, New York. – 1987. – pp. 317 – 339.
21. Haimson B.C., Avathi J.M. Stress measurements in anisotropic rock by hydraulic fracturing. // Applications of rock mechanics. New York. American Society of Civil Engineers. – 1975.
22. Haimson B.C., Avathi J.M. Stress measurements in anisotropic rock by hydraulic fracturing. // Applications of rock mechanics. New York. American Society of Civil Engineers. – 1975.
23. Heng S., Vang C., Wang L. and Daemen J.J.K. Experimental study on the hydraulic fracture propagation in shale. // Current Science. – Vol. 115. – No 3. – 2018. – pp.465 – 475.
24. Stoeckhert F., Molenda M., Brenne S., Alber M. Fracture propagation in sandstone and slate – Laboratory experiments, acoustic emissions and fracture mechanics. // Journal of Rock mechanics and Geotechnical Engineering. – No 7. – 2015. – pp. 237 – 249.
25. Рубцова Е.В. Стенд трехосного независимого нагружения для физического моделирования процесса измерительного гидроразрыва. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» Новосибирск: СГУГиТ. – 2015. – том 3. – С. 111 – 116.
26. Леонтьев А.В. Стенд для моделирования процесса гидроразрыва: модельные образцы и инструментарий. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018. XIV Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» Новосибирск: СГУГиТ. – 2018. – том 5. – С. 149 – 155.