

А. А. Скулкин¹, Е. В. Рубцова^{1}*

Лабораторные испытания герметизирующих элементов скважинного зонда для выполнения измерительного гидроразрыва

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

Аннотация. Приведена конструкция настольного лабораторного стенда для испытания скважинных зондов в составе комплекса «Гидроразрыв». В экспериментах использован полноразмерный двусторонний зонд, оснащенный пакерами из полиуретанового эластомера (твердость по шкале Шора 60 ShA) двух типов: цельной конструкции и составной из коротких уплотнительных элементов, разделенных металлическими шайбами. Установлен характер передачи давления на «скважину» при осевом сжатии герметизирующих элементов. В контакт со «скважиной» вначале приходит срединная часть цельного пакера, затем его краевые части. Составной пакер вступает в контакт со стенкой «скважины» одновременно срединными точками всех составных элементов. При давлении в распорном гидроцилиндре свыше 25 МПа коэффициент передачи давления на стенки «скважины» составного пакера значительно выше, чем цельного. Результаты лабораторных экспериментов подтверждают перспективность оснащения скважинных зондов для выполнения измерительного гидроразрыва составными пакерными элементами, преимуществом которых является также более высокая ремонтпригодность и низкая стоимость изготовления.

Ключевые слова: измерительный гидроразрыв, зонд, скважина, уплотнительный элемент, составной пакер, осевое сжатие, датчик давления

A. A. Skulkin¹, E. V. Rubtsova^{1}*

Laboratory testing of sealing elements of the borehole probe for measuring hydraulic fracturing

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

Abstract. The design of a desktop laboratory stands for testing borehole probes as part of the “Hydraulic fracturing” complex is presented. In the experiments, a full-size double-sided probe was used, equipped with packers made of polyurethane elastomer (Shore hardness 60 ShA) of two types: a solid structure and a compound of short sealing elements separated by metal washers. The nature of the pressure transfer to the “borehole” during axial compression of the sealing elements has been established. The middle part of the solid packer comes into contact with the “borehole” first, then its edge parts. The composite packer comes into contact with the “borehole” wall at the same time as the midpoints of all its constituent elements. When the pressure in the spacer hydraulic cylinder is over 25 MPa, the pressure transfer coefficient to the walls of the “borehole” of a composite packer is significantly higher than that of a solid one. The results of laboratory experiments confirm the prospects of equipping downhole probes for measuring hydraulic fracturing with composite packer elements, the advantage of which is also higher maintainability and low manufacturing cost.

Keywords: measuring hydraulic fracturing, probe, borehole, packing element, compound packer, axial compression, pressure sensor

Введение

Одним из известных и активно развиваемых методов инструментального контроля напряжений в массиве горных пород является измерительный гидроразрыв. Технически метод может быть реализован на значительных расстояниях от контура выработок, при этом возможны повторные замеры на выбранном интервале скважины, что повышает достоверность экспериментальных данных. Исследованию метода посвящены работы отечественных [1-5] и зарубежных авторов [6-10].

Для реализации измерительного гидроразрыва в рудничных условиях в ИГД СО РАН разработан измерительно-вычислительный комплекс «Гидроразрыв» [11]. Основным техническим средством в составе комплекса является скважинный зонд. При выполнении измерительного гидроразрыва зонд размещается в скважине на заданном расстоянии от кровли выработки, при помощи размещенных на корпусе зонда уплотнительных элементов (пакеров) герметизируют интервал скважины и нагружают его рабочим флюидом до достижения критических растягивающих напряжений, приводящих к образованию трещины гидроразрыва на стенке скважины. В конструкции скважинных зондов для измерительного гидроразрыва, разработанных в ИГД СО РАН, используются уплотнительные элементы зажимного типа из полиуретанового эластомера [12]. Конструктивно уплотнительный элемент представляет собой толстостенный цилиндр (твердость по шкале Шора 40-60 ShA), торцевые части которого выполнены более жесткими (твердость по шкале Шора до 80 ShA), что препятствует выдавливанию торцевых участков уплотнительных элементов при осевом сжатии в зазор между корпусом зонда и стенками скважины.

Для обеспечения герметизации исследуемого интервала скважины необходим надежный контакт пакера со стенкой скважины, исключающий проникновение рабочей жидкости в зону контакта или за его пределы («обыгрывание» пакера). Методом численного моделирования характера развития трещин гидроразрыва показано, что предотвращение эффекта «обыгрывания» пакеров обеспечивается при длине герметизирующих элементов более $3,75d$ (d – диаметров скважины) [13]. Однако при таких осевых размерах и большом кольцевом зазоре между эластомером и поверхностью скважины возникает проблема потери устойчивости уплотнительного элемента – его волнообразная деформация.

Для стабилизации цилиндрической формы уплотнительных элементов из полиуретанового эластомера при сжатии Леконцевым Ю.М. (ИГД СО РАН) предложено армировать их металлическими пружинами [14]. Уход от проблемы потери устойчивости возможен также за счет уменьшения осевого размера уплотнительного элемента путем компоновки зонда составными пакерами в виде коротких полиуретановых цилиндров с разделительными металлическими вставками между ними. Исследовательский интерес представляет изучение вопроса

надежности герметизации межпакерного интервала при использовании составных пакеров.

В настоящей работе приведены результаты лабораторных экспериментов по исследованию воздействия на стенки «скважины» составных и цельных герметизирующих элементов зонда при их осевом сжатии.

Стенд и методика лабораторных исследований

Лабораторные эксперименты выполнялись на настольном стенде (рис. 1).

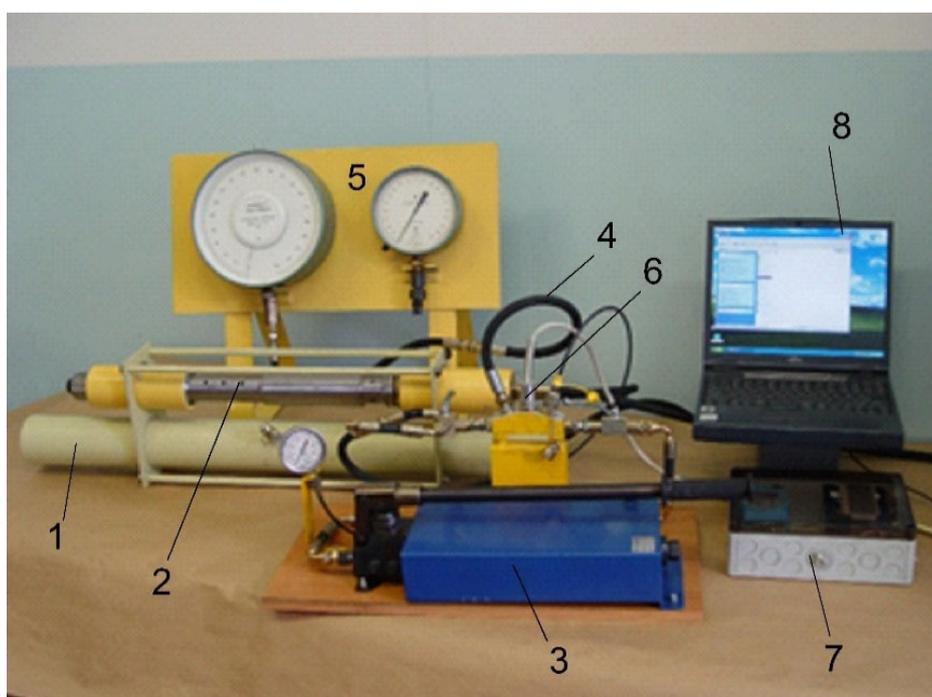


Рис 1. Настольный стенд для испытания скважинных зондов: 1 – труба для размещения скважинного зонда; 2 – распорный гидроцилиндр; 3 – ручной насос; 4 – рукава высокого давления; 5 – образцовые манометры; 6 – датчик давления в системе подачи флюида в распорный гидроцилиндр; 7 – устройство преобразования и передачи данных; 8 – портативный компьютер

В экспериментах использовался полноразмерный двусторонний скважинный зонд, который помещался в толстостенную металлическую трубу, имитирующую измерительную «скважину» диаметром 76 мм (стандартный размер скважин алмазного бурения). Зонд был оснащен пакерами двух типов: цельной конструкции из полиуретанового эластомера (твердость по шкале Шора 60 ShA) и составного типа. Последний состоял из трех герметизирующих элементов (материал аналогичный цельному пакеру), каждый длиной порядка одного диаметра «скважины», и металлических шайб между ними.

Функциональная схема испытаний скважинного зонда с различным исполнением герметизирующих элементов приведена на рис. 2. Для составного пакера контрольные сечения (отверстия в трубе для установки датчиков давления) вы-

бирались в срединной части каждого из герметизирующих элементов. Аналогично три контрольных сечения назначались по длине цельного пакера. Давление в каналах 9 и 10 создавалось ручным насосом. При подаче давления в распорный гидроцилиндр по каналу 9 происходило сжатие пакеров. По каналу 10 осуществлялась подача рабочего флюида в межпакерный интервал после завершения пакеровки. В ходе испытаний фиксировались показания датчиков давления в контрольных сечениях при росте давления в распорном гидроцилиндре, а также в процессе увеличения давления в межпакерном интервале после изоляции участка «скважины».

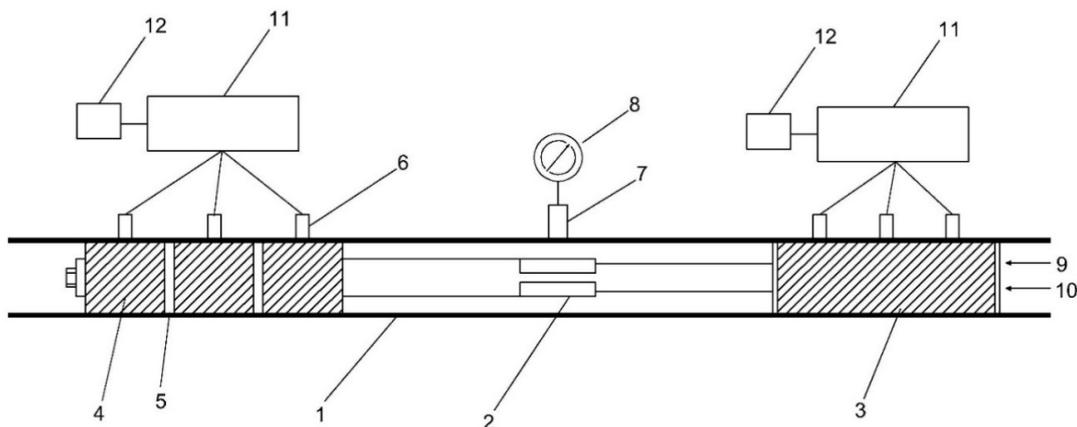


Рис 2. Функциональная схема испытаний скважинного зонда с разным исполнением герметизирующих элементов: 1 – металлическая труба; 2 – распорный гидроцилиндр; 3 – цельный герметизирующий элемент; 4 – элемент составного типа; 5 – металлические шайбы; 6 – датчики давления типа ЛХ-417; 7 – адаптер; 8 – манометр; 9 – канал подачи рабочего флюида в распорный цилиндр; 10 – канал подачи рабочего флюида в межпакерный интервал; 11 – устройство преобразования и передачи данных; 12 – портативный компьютер

Результаты экспериментов

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости величины давления в контрольных сечениях трубы, имитирующей скважину, от давления в распорном гидроцилиндре. Данные зависимости показывают характер воздействия сжимаемых уплотнительных элементов на стенки «скважины».

Анализируя полученные диаграммы, можно отметить, что при осевом сжатии давление на «скважину» цельного герметизирующего элемента передается неравномерно. В контакт со «скважиной» вначале приходит срединная часть цельного пакера, затем его краевые части. Составной пакер вступает в контакт со стенкой «скважины» одновременно срединными точками всех составных элементов. При подаче давления в распорный гидроцилиндр свыше 25 МПа наблюдается резкий рост давления на стенки «скважины» у составного пакера, в сравнении с цельным, что говорит о более быстром достижении надежной герметизации исследуемого участка «скважины» составным пакером (рис. 3).

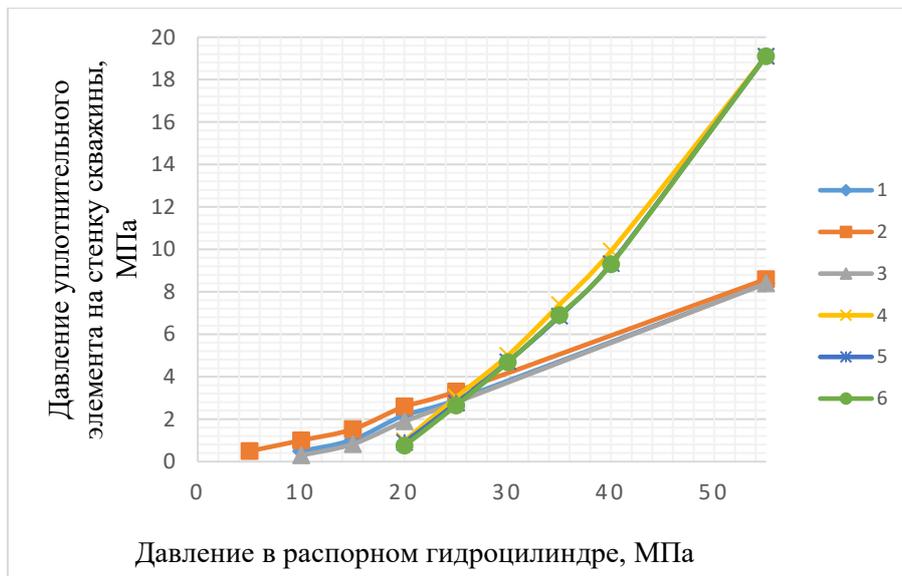


Рис. 3. Характер воздействия сжимаемых пакеров на стенки «скважины»: 1, 2, 3 – внешнее, срединное и внутреннее сечения сплошного пакера; 4, 5, 6 – внутреннее, срединное и внешнее сечения составного пакера

После изоляции участка «скважины» (при давлении уплотнительных элементов на стенки «скважины» 8,6 МПа) рабочий флюид под давлением подавался по каналу 10 в межпакерный интервал, что приводило к дополнительному поджатию уплотнительных элементов. Воздействие пакеров на стенки «скважины» при изменении рабочего давления в межпакерном интервале проиллюстрировано на рис. 4.

Как можно видеть, характер воздействия на стенки «скважины» цельного и составного пакеров при увеличении давления в межпакерном интервале идентичен. Оба типа пакеров показывают усиление степени воздействия на «скважину» при увеличении давления в межпакерном интервале свыше 25 МПа. Чрезмерный рост давления в межпакерном интервале может привести к расклиниванию уплотнительных элементов. Этот вопрос требует дополнительных экспериментов с целью определения величины допустимого хода поршня распорного гидроцилиндра и совершенствования конструкции скважинного зонда.

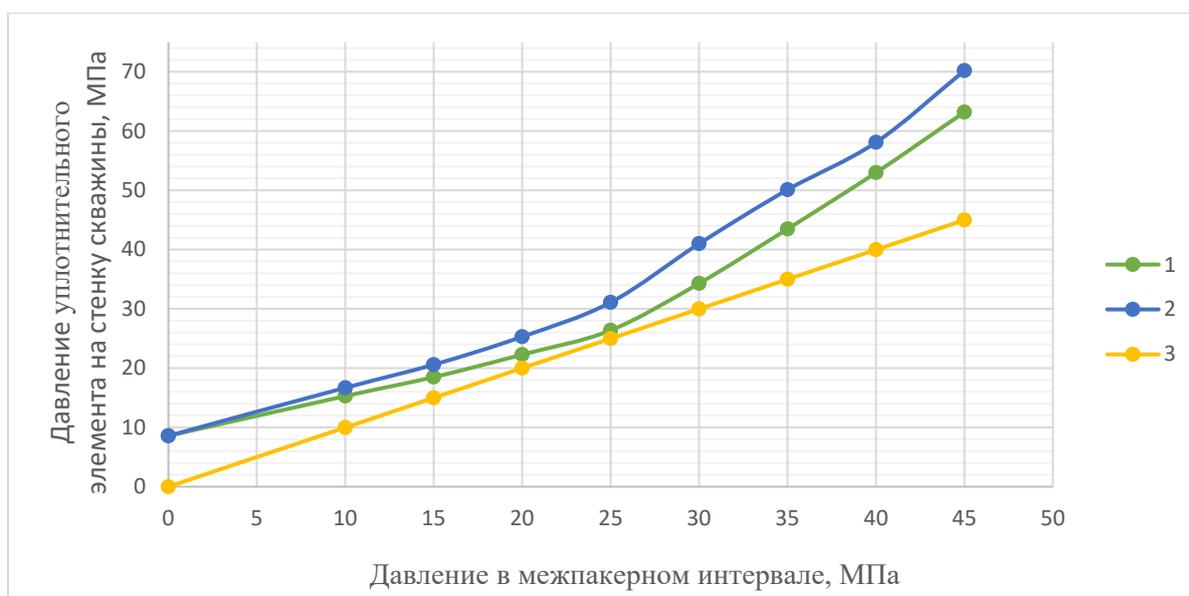


Рис. 4. Воздействие уплотнительных элементов на стенки «скважины» при повышении давления рабочего флюида в межпакерном интервале: 1 – сплошной пакер; 2 – составной пакер; 3 – давление в межпакерном интервале

Заключение

Выполненный цикл лабораторных экспериментов позволил сравнить характер воздействия пакеров на стенки «скважины» при их различном конструктивном исполнении.

Показано, что при сжатии цельного уплотнительного элемента из полиуретанового эластомера твердостью по шкале Шора 60 ShA в контакт со «скважиной» вначале приходит срединная часть пакера, затем его краевые части. Составной пакер вступает в контакт со стенкой «скважины» одновременно средними точками составных элементов, при этом наблюдается больший коэффициент передачи давления от осевого поджатия на стенки «скважины», чем в цельном.

Конструкция скважинного зонда с составными пакерными элементами в виде коротких цилиндров из полиуретанового эластомера с разделительными металлическими вставками между ними представляется перспективной. Ее достоинствами также являются более высокая ремонтпригодность и низкая стоимость изготовления уплотнительных элементов без армирования пружинами.

Выполненное исследование имеет практическую значимость для усовершенствования конструкции скважинных зондов в составе комплекса «Гидроразрыв», являющегося единственной отечественной разработкой, применяемой в рудничных условиях для оценки напряжений в массиве горных пород методом измерительного гидроразрыва.

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 124020700085-5).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опарин В. Н., Журавков М. А., Потапов В. П., Каленицкий А. А. и др. Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горно-технических и природных системах. Рос. акад. наук Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018 – 549 с.
2. 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.
3. Рубцова Е. В., Скулкин А. А. Развитие методических основ измерительного гидроразрыва // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 5. – С. 188-191.
4. Leontiev A. V., Rubtsova E. V. and Lekontsev Yu. M. Improvement of downhole probe control system for the measurement of hydraulic fracturing at considerable distances from the working contour, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Sci., 2021, vol. 773, 012014.
5. Панов А.В., Мирошниченко Н.А., Скулкин А.А. Способ интерпретации данных множественного измерительного гидроразрыва для определения полного тензора напряжений в породном массиве // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: сб. материалов в 8 т. Т. 2, № 3. – Новосибирск: СГУГИТ. – 2022. – С. 242-249.
6. 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 (HTRF) // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2003. – № 40. – P. 1012-1020.
7. Synn J. H., Park C., Jung Y. B., Sunwoo C., Kim K. S., Choi S. Y., Song M. K., Shin I. J., Rutqvist J. Integrated 3-D stress determination by hydraulic fracturing in multiple inclined boreholes beneath an underground cavern // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2015. – № 75. – P. 44-55.
8. Yokoyama T., Sakaguchi K., Ito T. Re-Opening and Shut-in Behaviors under a Large Ratio of Principal Stresses in a Hydraulic Fracturing Test. Symposium of the International Society for Rock Mechanics. Proceeding Engineering. – 2017. – № 191. – P. 862-868.
9. Heng S., Vang C., Wang L. and Daemen J.J.K. Experimental study on the hydraulic fracture propagation in shale // Current Science. – 2018. – Vol. 115, No 3 – P. 465-475.
10. Krietsch H, Gischig V., Evans K., Doetsch J., Dutler N. O., Valley B., Amann F. Stress Measurements for an In Situ Stimulation Experiment in Crystalline Rock: Integration of Induced Seismicity, Stress Relief and Hydraulic Methods // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2019. – № 52(2). – P. 517-542.
11. Леонтьев А. В., Рубцова Е. В., Леконцев Ю. М., Качальский В. Г. Измерительно-вычислительный комплекс «Гидроразрыв» // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 1. – С. 104-110.
12. Рубцова Е.В., Скулкин А.А. Современное оснащение измерительно-вычислительного комплекса "Гидроразрыв" и опыт его применения при экспериментальном исследовании действующих полей напряжений в соляном массиве // Проблемы недропользования [Сетевое периодическое научное издание]. – Екатеринбург: ИГД Уро РАН. – 2018. – № 1(16). – С. 51-58. – Режим доступа: https://elibrary.ru/title_about.asp?id=52020.
13. Зиновьев А.А., Патутин А.В., Сердюков С.В. Численное моделирование процесса разгрузки угле-породного массива // Интерэкспо ГЕО Сибирь–2012. VIII Международная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых»: сб. материалов в 2 т. Т.2. – Новосибирск: СГГА. – 2012. – С. 174 – 178.
14. Леконцев Ю.М., Ушаков С.Ю., Мезенцев Ю.Б. Совершенствование технологии дегазации угольных пластов // Научно-технический и методический журнал «Рациональное освоение недр». – М. – 2019. – № 6. – С. 80–82.

© А. А. Скулкин, Е. В. Рубцова, 2024