

УДК 622.02:531

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

Скулкин Александр Александрович

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

**СОВРЕМЕННОЕ ОСНАЩЕНИЕ
ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО
КОМПЛЕКСА «ГИДРОРАЗРЫВ»
И ОПЫТ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ
ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ
ИССЛЕДОВАНИИ ДЕЙСТВУЮЩИХ
ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ
В СОЛЯНОМ МАССИВЕ**

Аннотация:

В статье описано современное оснащение комплекса «Гидроразрыв», разработанного в ИГД СО РАН в 80-е годы. В составе комплекса система регистрации и обработки экспериментальных данных в шахтных условиях с беспроводным каналом для передачи данных и управляющих команд между устройством регистрации и портативным компьютером, программные средства сопровождения экспериментов на основе пакета графического программирования «LabView». Для выполнения экспериментов по определению компонент действующих напряжений в соляном массиве рудников ПАО «Уралкалий» комплекс «Гидроразрыв» дооснащен двумя измерительными зондами новой конструкции. Использован зонд с четырьмя пакерующими элементами и двумя гидроцилиндрами, выполняющими их осевое сжатие, а также зонд, оснащенный пакерующими элементами, армированными пружинами. В 2016 г. с использованием комплекса «Гидроразрыв» в шахтном поле рудников СКРУ-1,2,3 ПАО «Уралкалий» выполнено 75 тестов измерительного гидроразрыва. В качестве примера в статье рассмотрены условия проведения и результаты экспериментальных исследований, выполненных на руднике СКРУ-2. Эксперименты проводились на глубине порядка 200 м в главном транспортном штреке, где были реализованы две замерные станции, на которых выполнено 24 теста гидроразрыва. Выполненные на рудниках СКРУ – 1,2,3 ПАО «Уралкалий» в 2016 г. экспериментальные работы подтверждают возможность успешного применения измерительно-вычислительного комплекса «Гидроразрыв» для определения параметров поля напряжений в глубине соляного массива. Экспериментально определенные значения вертикальной компоненты напряжений близки к расчетной величине от веса налегающих пород, а уровень компонент горизонтальных напряжений в 2 – 3 раза превышает значение вертикальной составляющей.

Ключевые слова: гидроразрыв, соляной массив, измерительно-вычислительный комплекс, устройство регистрации, зонд, пакерующий элемент, скважина, тест, давление, компоненты напряжений

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.01.052

Rubtsova Ekaterina V.

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Senior Research Worker,
Chinakal Institute of Mining
of Siberian Branch of RAS,
630091, Novosibirsk, Krasny prospect, 54
e-mail: rubth@misd.ru

Skulkin Alexander A.

Junior Research Worker,
Chinakal Institute of Mining
of Siberian Branch of RAS
e-mail: chuptt@yandex.ru

**CURRENT EQUIPMENT
OF MEASURING AND COMPUTING
COMPLEX “GIDRORAZRYV”
AND ITS APPLICATION IN INVESTIGATION
OF ACTUAL STRESS FIELDS
IN SALT ROCK MASS**

Abstract:

The paper describes the updated outfit of measuring and computing complex “Gidrorazryv” designed at the Institute of Mining, of SB of RAS in the 1980s. The complex includes an in situ data recording and processing system with the wireless transmission of data and control commands between the recording unit and portable computer, as well as a software to support experiments based on LabView graphic programming package. For the experimental determination of actual stresses components in salt rocks in mines of URALKALI, Gidrorazryv-complex is equipped with two measuring probes of new design. Furthermore, there is a probe with four packers and two cylinders for axial compression of the packers, and a probe fitted with packers reinforced by springs. In 2016 Gidrorazryv-complex was used in 75 hydraulic fracturing stress measurement tests in SKRU Mines 1, 2 and 3 of URALKALI. As an example the paper describes the experimentation conditions and results obtained in SKRU Mine-2. The tests were carried out at two measurement points at the depth of 200 m in the main haulage drift. All in all, 24 hydrobreacking tests were performed in that mine. The experimentation in SKRU Mines 1, 2 and 3 of URALKALI in 2016 prove the successful applicability of measuring and computing complex “Gidrorazryv” to determine stress state field parameters in deep-level of salt rock mass. The experimentally estimated vertical stresses were close in value to the calculated vertical stress component due to the weight of the overburden rock mass, and the horizontal stresses exceeded the vertical stresses by 2–3 times.

Keywords: hydrofracturing, salt rock mass, measuring-and-computing complex and system, recording unit, probe, packer, hole, test, pressure, components of stresses

Введение

Одним из известных методов геомеханических исследований, применяемых для экспериментального определения напряжений в массиве горных пород как в России, так и за рубежом, является метод измерительного гидроразрыва [1 – 4]. В ИГД СО РАН выполнен большой объем исследований, направленных на развитие методических подходов и технических средств для практической реализации метода [5 – 7].

Измерительно-вычислительный комплекс «Гидроразрыв» разработан в ИГД СО РАН в 80-е годы. В первоначальной комплектации комплекс включал в себя двухпакерный зонд, нагнетательную установку, датчик давления и регистратор, обеспечивающий измерение и индикацию давления в гидросистеме, запись данных в блок памяти с возможностью их последующего считывания и обработки в компьютере в лабораторных условиях.

К числу первых примеров практического применения данного комплекса для контроля напряженного состояния соляного массива можно отнести эксперименты на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей, выполненные совместно специалистами ИГД СО РАН и Горного института УрО РАН в 90-х годах [5]. Была проведена серия измерительных гидроразрывов в условиях рудников БКЗ-4 (ПО «Уралкалий») и СКРУ-3 (ПО «Сильвинит»). Несмотря на то что выполнение экспериментов в соляном массиве существенно осложнялось некачественной подготовкой измерительных скважин (отклонения от прямолинейности, заштыбованность и т.п.), по совокупности выполненных измерений дана оценка минимальных и максимальных напряжений, действующих в массиве. Отмечена устойчивая повторяемость полученных значений напряжений и согласованность их с величинами, установленными другими методами. Это позволило сделать вывод о возможности успешного применения метода гидроразрыва для контроля напряжений в соляных породах. Следует также отметить, что в своей первоначальной комплектации комплекс «Гидроразрыв» использовался в экспериментальных исследованиях напряженного состояния массива на рудниках Норильского ГМК, Таштагольского месторождения, в подземных условиях ГХК (г. Железногорск).

Современное оснащение комплекса «Гидроразрыв» и его применение при исследовании напряженного состояния соляного массива

К настоящему времени реализованы принципиально новые подходы в построении технических и программных средств комплекса [8]. Комплекс оснащен системой регистрации и обработки экспериментальных данных в шахтных условиях с использованием программных средств сопровождения экспериментов на основе пакета графического программирования «LabView». Система регистрации обеспечивает визуальный контроль на экране портативного компьютера (ПК) процесса изменения давления в межпакерном пространстве в ходе эксперимента, что дает возможность текущей оценки выполнения гидроразрыва.

Отличительной особенностью современного исполнения технических средств является использование беспроводного канала связи ПК с устройством регистрации экспериментальных данных (рис. 1). В процессе экспериментов аналоговый сигнал от датчика давления поступает в устройство преобразования и передачи данных (выполнено в отдельном корпусе), где преобразуется модулем ADAM-4118/4018 в цифровой код, затем в согласующем модуле ADAM-4520 – в последовательность байтовых данных стандарта RS-232, которые по радиоканалу стандарта Bluetooth передаются в ПК. Наличие беспроводного канала связи средств измерения с компьютером обеспечивает мобильность и комфортные условия при выполнении шахтных экспериментов, а также отвечает требованиям искробезопасности при производстве работ в подземных условиях.

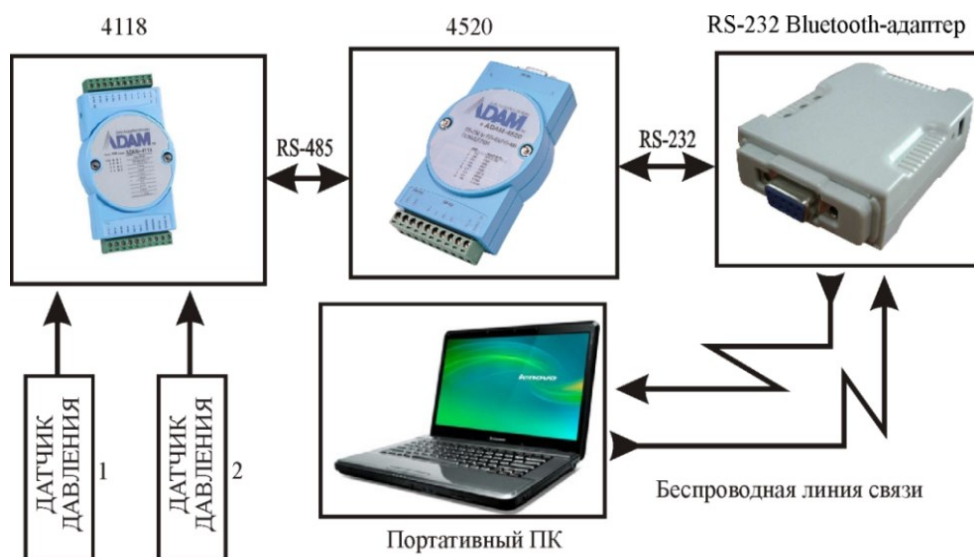


Рис. 1 – Функциональная схема системы преобразования и передачи данных

Технические характеристики устройства регистрации: напряжение питания – 12 В; потребляемая мощность – 0,5 Вт; время непрерывной работы – 20 час; число каналов – 2; диапазон измерений – от 0 до 60 МПа; погрешность измерений – не хуже 2 %; линейность – программируемая; температурный диапазон – от 0 до 30° С; предельная дальность связи в открытом пространстве – не менее 100 м.

Большое внимание при техническом переоснащении комплекса уделялось совершенствованию конструкции зонда: исследованы и конструктивно проработаны различные варианты его исполнения. Для выполнения экспериментов по определению действующих напряжений в условиях рудников СКРУ-1, 2, 3 ПАО «Уралкалий» комплекс «Гидроразрыв» дооснащен двумя измерительными зондами новой конструкции. Использован зонд (рис. 2) с четырьмя пакерующими элементами и двумя гидроцилиндрами, выполняющими их осевое сжатие. Отличительная особенность конструкции – синхронное функционирование пакерующих элементов за счет приведения их в рабочее состояние однотипными силовыми устройствами (плунжерными парами). Кроме того, данная конструкция уменьшает вероятность проникновения рабочего флюида из межпакерной области (в процессе гидроразрыва) в зоны контакта пакеров со стенкой скважины и за его пределы, т.е. исключается эффект «обыгрывания» пакеров. В конструкции зонда заложена возможность изменять протяженность межпакерного пространства путем замены центральной части несущего стержня зонда. При выполнении тестов гидроразрыва в зоне расположения щелей – концентраторов (в целях получения поперечного разрыва) размер межпакерного пространства составлял 2 – 3 диаметра скважины; в остальных случаях 5 – 6 диаметров.

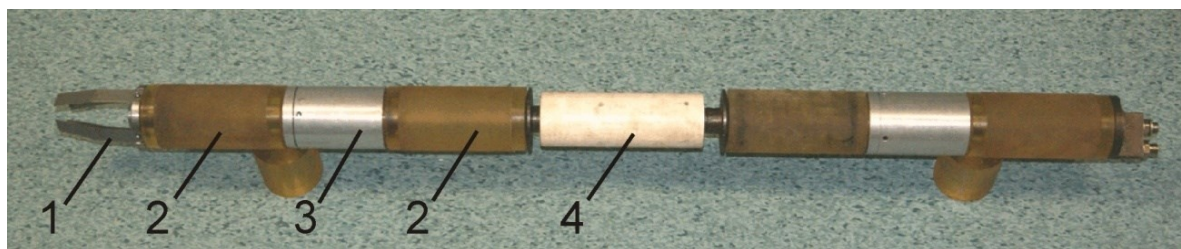


Рис. 2 – Зонд с четырьмя пакерами:
1 – направляющие пластины; 2 – полиуретановые пакеры; 3 – гидроцилиндры;
4 – втулка для заполнения межпакерного пространства

В выполненных в соляном массиве экспериментах также успешно опробован зонд, оснащенный пакерующими элементами, армированными пружинами (рис. 3). Армированные пружинами пакеры в меньшей степени подвергаются износу (истиранию наружной поверхности пакера при перемещении вдоль скважин) за счет более надежного возвращения их в первоначальное состояние после снятия сжимающих напряжений.

Оба зонда для беспрепятственной досылки в измерительные скважины с начальным участком большего диаметра оснащены направляющими пластинами. Техническое оснащение комплекса позволило контролировать напряжения на удалении 10 м и более от контура подземных выработок.

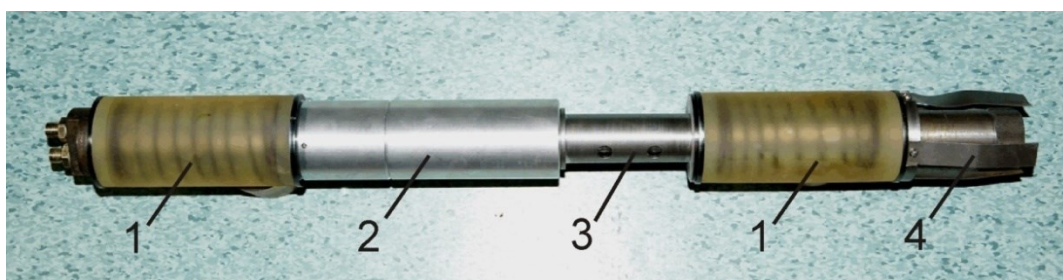


Рис. 3 – Зонд с пакерующими элементами, армированными пружинами:

1 – полиуретановые пакеры с пружинами; 2 – гидроцилиндр;
3 – втулка распорная; 4 – направляющие пластины

Важным элементом методики измерительного гидроразрыва является выбор способа интерпретации экспериментальных данных гидроразрыва. Для определения компонент действующих в массиве напряжений использовались следующие параметры, которые определялись по экспериментальным диаграммам «давление – время»: P_c – давление гидроразрыва; P'_s – давление запирания при гидроразрыве; P_r – давление раскрытия трещины разрыва при повторном нагружении; P''_s – давление запирания при повторном нагружении.

Наибольшее влияние на достоверность оценки действующих в массиве напряжений оказывает точность определения давления запирания, т.е. давления, соответствующего моменту равновесного состояния открытой трещины, при котором давление флюида уравнивает воздействие нормальных к плоскости трещины напряжений в породном массиве. Нами выполнена сравнительная оценка известных способов путем физического моделирования измерительного гидроразрыва в образцах из оргстекла с использованием стенда независимого трехосного нагружения [9]. Наиболее точные результаты (соответствие расчетного значения величины давления запирания заданной минимальной компоненте напряжений в образце) показывают методы, основанные на использовании диаграмм « P относительно $\log \Delta t$ » и « dP/dt относительно P ». Погрешность определения давления запирания в этих случаях не превышала 5 %. Эти способы использованы нами при обработке экспериментальных данных, полученных при выполнении тестов гидроразрыва.

В 2016 г. с использованием комплекса «Гидроразрыв» в шахтном поле рудников СКРУ-1,2,3 ПАО «Уралкалий» выполнено 75 тестов измерительного гидроразрыва на семи замерных станциях. Места расположения замерных станций:

– рудник СКРУ-1: замерные станции № 9 и № 10 (Северо-восточная подработка 1, блок 1, дренажный уклон, на расстоянии 50 и 70 м от сопряжения, пласт КС); замерная станция № 11 (Северо-западная подработка 1, блок 2 восточный, панельный вентиляционный штрек, пласт КС); замерная станция № 12 (Северо-западная подработка 1, блок 2 восточный, разведочная выработка, пласт КрII);

– рудник СКРУ-2: замерные станции № 7 и № 8 (главный юго-восточный транспортный штрек № 2, участок между двумя уклонами);

– рудник СКРУ-3: замерная станция № 5 (блок 15, панель 15, юг); замерная станция № 6 (блок 15, панель 17, юг).

Рассмотрим в качестве примера условия проведения и результаты экспериментальных исследований, выполненных с использованием комплекса «Гидроразрыв» на руднике СКРУ-2 в июле 2016 г. Эксперименты выполнены на глубине порядка 200 м. Были реализованы две замерные станции № 7 и 8 в главном транспортном штреке на расстоянии 20 м друг от друга. Зона расположения замерных станций находилась вдали от фронта очистных работ и соседних выработок. Подработка или надработка данной зоны отсутствовала.

Обоснование конструкции замерных станций (количество скважин и их направленность) связано, в первую очередь, с выбором методики расчета компонент действующих в массиве напряжений по данным тестов гидроразрыва, выполненных в нескольких скважинах. Классическая методика измерительного гидроразрыва предполагает выполнение тестов в трех ортогональных скважинах: вертикальной и двух горизонтальных. Однако выполнение горизонтальных скважин, отвечающих требованиям проведения тестов гидроразрыва, более трудоемко, чем выполнение скважин наклонных. Так, выполнение горизонтальных скважин на руднике СКРУ-2 оказалось невозможным по производственным условиям, ввиду отсутствия сжатого воздуха для очистки скважин от штыба. В связи с этим была применена предложенная нами ранее методика [10], позволяющая определять величину векторов главных напряжений, действующих в массиве в плоскости расположения скважин, по данным тестов в произвольно направленных скважинах при условии, что трещина гидроразрыва ортогональна оси скважины. На замерной станции № 7 были выполнены две измерительные скважины (вертикальная и наклонная под углом 60°); на станции № 8 – три скважины (вертикальная и две наклонные под углами 30° и 60°). При проходке измерительных скважин использовался специально разработанный буровой инструмент, обеспечивающий заданные геометрические параметры, прямолинейность и качественную поверхность скважин [11]. Для обеспечения заданной направленности трещин гидроразрыва при помощи специального устройства (щелеобразователя) во всех скважинах на расстоянии 70 см от забоя ортогонально их оси предварительно были нарезаны дискообразные иницирующие щели.

В ходе выполнения тестов гидроразрыва экспериментальные диаграммы «давление – время» (рис. 4), позволяющие контролировать процессы нагружения и раскрытия трещин, отображаются на экране ПК. Программные средства комплекса «Гидроразрыв» позволяют сразу после завершения эксперимента в шахтных условиях определять по диаграммам характерные значения давлений и давать оценку величины компонент действующих в массиве напряжений.

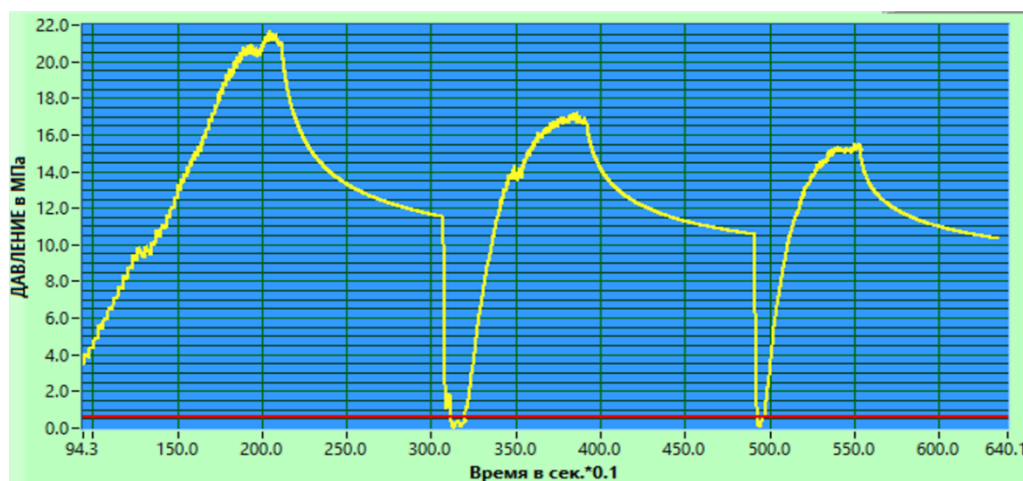


Рис. 4 – Экспериментальная диаграмма «давление – время» (рудник СКРУ-2, замерная станция № 7, скважина 60° , глубина 8 м, 26.07.2017)

В табл. 1 приведен журнал наблюдений, содержащий характерные величины давления, полученные при выполнении тестов гидроразрыва на замерных станциях № 7, 8 (рудник СКРУ-2).

С использованием комплекса «Гидроразрыв» на замерных станциях № 7 и 8 выполнено 24 теста гидроразрыва. В результате обработки экспериментальных данных установлены следующие значения действующих в массиве напряжений: вертикальная компонента $6,7 \div 7,2$ МПа; горизонтальные компоненты $\sigma_{\min} = 9,6 \div 12,4$ МПа и $\sigma_{\max} = 16,4 \div 19,0$ МПа.

Таблица 1

**Журнал наблюдений при выполнении тестов гидроразрыва
на замерных станциях № 7, 8 (рудник СКРУ-2)**

Координаты эксперимента		1-е нагружение		2-е нагружение		3-е нагружение	
Индекс измерительной скважины	Расстояние от контура выработки до места гидроразрыва, м	Давление гидроразрыва P_c , МПа	Давление запириания P'_s , МПа	Давление раскрытия трещины, P_r , МПа	Давление запириания P''_s , МПа	Давление раскрытия трещины P'_r , МПа	Давление запириания P'''_s , МПа
7(90°)	10,0	28,7	7,0	23,0	11,4	21,1	9,4
7(60°)	10,0	20,2	13,5	16,3	13,0	15,3	13,8
7(60°)	8,5	15,3	10,4	14,0	9,8	13,3	10,4
7(60°)	8,0	21,7	13,5	17,2	12,0	15,4	11,6
8(90°)	10,0	10,8	6,5	12,4	7,4	11,9	7,1
8(90°)	9,0	10,5	9,0	13,0	10,8	12,5	10,3
8(60°)	10,0	15,3	11,1	14,3	9,8	13,5	9,7
8(30°)	7,0	13,1	9,2	10,9	8,6	10,8	8,0

Примечание. В индексах измерительных скважин последовательно указаны номера замерных станций и ориентация скважин относительно горизонтали (град.).

Заключение

Выполненные на рудниках СКРУ - 1,2,3 ПАО «Уралкалий» в 2016 г. экспериментальные работы подтверждают возможность успешного применения измерительно-вычислительного комплекса «Гидроразрыв» для определения параметров поля напряжений в глубине соляного массива.

По результатам 75 тестов измерительного гидроразрыва, выполненных с использованием комплекса «Гидроразрыв», установлено, что значения вертикальной компоненты напряжений, действующих в соляных породах указанных рудников, близки к расчетной величине от веса налегающих пород, а уровень компонент горизонтальных напряжений в 2 – 3 раза превышает значение вертикальной составляющей.

Литература

1. Опарин В.Н. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / В.Н. Опарин, А.Д. Сашурин и др.; отв. ред. М.Д. Новопашин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 449 с.
2. Zhao, J., Hefny, A.M., Zhou, Y.X. Hydrofracturing in situ stress measurements in Singapore granite // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. - 2005. - Vol. 42, issue 4, June. - P. 577 – 583.
3. Ziaie Moayed, R, Izadi, E, Fazlavi, M. In-situ stress measurements by hydraulic fracturing method at Gotvand Dam site, Iran Turkish // *J. Eng. Env. Sci.* 36 (2012) - P. 179 - 194.
4. Joong-HoSynn, ChanPark, Yong-BokJung, ChoonSunwoatc. Integrated 3-Dstressdetermination by hydraulic fracturing in multiple inclined boreholes beneath an underground cavern // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*. 75 (2015) - P. 44 - 5.
5. Леонтьев А.В. Опыт практического применения измерительного гидроразрыва / А.В. Леонтьев, С.Н. Попов // *Горный журнал*. – 2003. – № 3. – С. 37 – 43.
6. Павлов В.А. Развитие метода гидроразрыва применительно к оценке напряженного состояния проницаемых горных пород / В.А. Павлов, А.В. Янкайте, С.В. Сердюков // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2009. – № 12. – С. 248 – 255.
7. Сердюков С.В. К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва / С.В. Сердюков, М.В. Курленя, А.В. Патутин // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2016. – № 6. – С. 6 – 14.
8. 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.
9. Рубцова Е.В. О методах косвенного определения величины давления запираения трещины при измерительном гидроразрыве / Е.В. Рубцова, А.А. Скулкин // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»*. – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – Т. 3. – С. 265 – 271.
10. Рубцова Е.В. Развитие методических основ измерительного гидроразрыва / Е.В. Рубцова, А.А. Скулкин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2013. – № 5. – С. 188 – 191.
11. Леконцев Ю.М. Буровой инструмент и устройства для выполнения измерительных скважин в соляных породах / Ю.М. Леконцев, Е.В. Рубцова, А.А. Скулкин // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»*. – Новосибирск: СГУГиТ, 2017. – Т. 2. – С. 129 – 133.