

*А. А. Скулкин<sup>1</sup>, Е. В. Рубцова<sup>1\*</sup>*

## **О проведении измерительного гидроразрыва в скважинах с природными трещинами**

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

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных работ, выполненных в условиях Риддер-Сокольного рудника ТОО «Казцинк» с использованием комплекса «Гидроразрыв». Реализована технология измерительного гидроразрыва по классической схеме в ненарушенных породах и на участках с выраженной природной трещиноватостью. Определены нормальные к плоскости трещин напряжения по величине давления запираения. Изучена возможность использования данных о раскрытии природных трещин для определения компонент действующих напряжений в рамках предложенной ранее методики направленного гидроразрыва, выполненного в трех разноориентированных скважинах. Сравнение экспериментальных данных с расчетными значениями показывает хорошую сходимость результатов. Установлено, что наличие в скважинах ортогональных оси трещин может явиться альтернативой нарезанию поперечных щелей при осуществлении направленного измерительного гидроразрыва в разноориентированных скважинах.

**Ключевые слова:** измерительный гидроразрыв, скважина, природная трещина, компоненты напряжений, давление запираения

*A. A. Skulkin<sup>1</sup>, E. V. Rubtsova<sup>1\*</sup>*

## **Measuring hydraulic fracturing implementation in boreholes with natural fissures**

<sup>1</sup>Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russian Federation  
\*e-mail: rubth@misd.ru

**Abstract.** The results of experimental work performed in the conditions of the Ridder-Sokolny mine, Kazzinc LLP, using the complex "Hydrofrac" are presented. The measuring hydraulic fracturing technology according to the classical scheme was implemented in intact rocks, as well as in areas with pronounced natural fissuring. The value of stress that is normal to the plane of fissures was determined according to the shut-in pressure magnitude. The possibility of using data on the opening of natural fissures to determine the acting stress components was studied within the framework of the previously proposed method of directional hydraulic fracturing performed in three differently oriented boreholes. Comparison of experimental data with calculated values shows good convergence of results. It has been established that the presence of fissures that are orthogonal to borehole axis can be an alternative to cutting transverse slots when performing directional measuring hydraulic fracturing in differently oriented boreholes.

**Keywords:** measuring hydraulic fracturing, borehole, natural fissures, stresses, shut-in pressure

## *Введение*

Необходимость инструментальной оценки параметров напряженного состояния массива горных пород становится особенно востребованной в связи с увеличением глубин добычи полезных ископаемых и ухудшением горно-геологических условий [1]. Поиск рациональных и экономически выгодных приемов и схем выполнения натуральных измерений, повышение качества и достоверности экспериментальных данных и способов их интерпретации являются актуальными задачами.

Среди известных методов инструментального контроля напряжений измерительный гидроразрыв выделяется возможностью проведения измерений на значительных расстояниях от поверхности обнажений, а также возможностью выполнения повторных замеров на одном участке с целью повышения достоверности экспериментальных данных. Этот метод активно развивается за рубежом [2-5], в России исследованием метода и разработкой технических средств для его реализации в шахтных условиях занимаются только в ИГД СО РАН [6-8].

Как показано в [9], величину и ориентацию действующих в массиве горных пород напряжений можно определить по данным направленного измерительного гидроразрыва в трех произвольно ориентированных скважинах, выполненных в плоскости ортогональной оси выработки. Предложенная методика была использована при экспериментальной оценке параметров поля напряжений соленосных пород на рудниках Верхнекамского месторождения [10]. Технология проведения направленного гидроразрыва стенок скважины предполагала предварительное нарезание в плоскости ортогональной оси измерительных скважин кольцевых щелей-концентраторов напряжений. Операция нарезания поперечных иницирующих щелей выполнялась с помощью специально разработанных для условий калийных рудников щелеобразователей [11].

Следует отметить, что формирование щелей-концентраторов напряжений в стенках скважин, пройденных в крепких горных породах, вызывает определенные трудности. К настоящему времени прошли испытания и применяются в шахтных условиях только щелеобразователи, предназначенные для пород мягких и средней прочности.

В связи с этим практический интерес представляет изучение возможности использования для выполнения направленного измерительного гидроразрыва природных трещин, ортогональных оси измерительной скважины.

Известно, что испытание одиночной изолированной природной трещины впервые предложено Cornet F.H. и Valette B. [12, 13]. В данной методике измерительного гидроразрыва вместо образования новой трещины в ненарушенных породах предусмотрено открытие уже существующей природной трещины произвольной направленности (углы падения и простирания трещины должны определяться экспериментально). Гидравлическим тестом оценивается единственный параметр – уровень нормальных напряжений к плоскости трещины, который надежно определяется по величине давления запираения. В отечественной практике инструментального контроля напряжений на подземных рудниках данный подход ранее не использовался.

В связи с вышеизложенным актуальным является исследование возможности использования данных экспериментов по гидрораскрытию природных поперечных трещин для определения компонент действующих напряжений по предложенной нами в [9] методике направленного гидроразрыва в разноориентированных скважинах.

### ***Объект и методика экспериментальных исследований***

Исследовательские работы проводились на Риддер-Сокольном руднике ТОО «Казцинк» с использованием комплекса «Гидроразрыв» [14]. Были опробованы различные технологии проведения измерительного гидроразрыва: варианты с классической схемой проведения гидроразрыва на ненарушенных участках скважин, а также с гидрораскрытием природных трещин.

Одним из объектов исследований явилась замерная станция, расположенная в Быструшинской залежи (БСЗ) на горизонте № 18, штрек 25 (рис. 1).



Рис 1. Схема расположения замерной станции БСЗ в плане

Для апробации предложенной нами методики направленного гидроразрыва с использованием данных по раскрытию природных трещин выполнено видеонаблюдение геологоразведочных скважин, расположенных в плоскости ортогональной оси выработки. Для реализации методики необходимо проведение направленного гидроразрыва в трех скважинах, однако, ортогональные трещины удалось найти только в двух. Поэтому было предложено использовать две разнонаправленные скважины с природными ортогональными трещинами, а в качестве третьей принять «условную» вертикальную скважину с известным напряжением на ортогональной площадке.

При проведении замеров по классической методике на замерной станции БСЗ вертикальная компонента напряжений составила  $\sigma_{\text{верт}} = 10.6 \div 13.04$  МПа. Расчетная величина литостатического давления  $\gamma H$  ( $\gamma$  – плотность пород, осредненная по глубине,  $H$  – глубина) на данной замерной станции при примерной средней плотности пород  $2.7 \text{ г/см}^3$  составляет 11.9 МПа, что практически совпадает с усредненным значением  $\sigma_{\text{верт}}$ , полученным экспериментально, и может быть использовано в дальнейших расчетах.

Эксперименты проводились в скважине БСЗ-1, пройденной под углом  $+30^\circ$  к горизонтали, и БСЗ-2, пройденной под углом  $+2^\circ$  к горизонтали. Расстояние  $L$  от контура выработки до природных трещин составило 9 м и 8 м для БСЗ-1 и БСЗ-2, соответственно. На рис. 2 приведены снимки участков измерительных скважин с природными ортогональными осевыми трещинами.

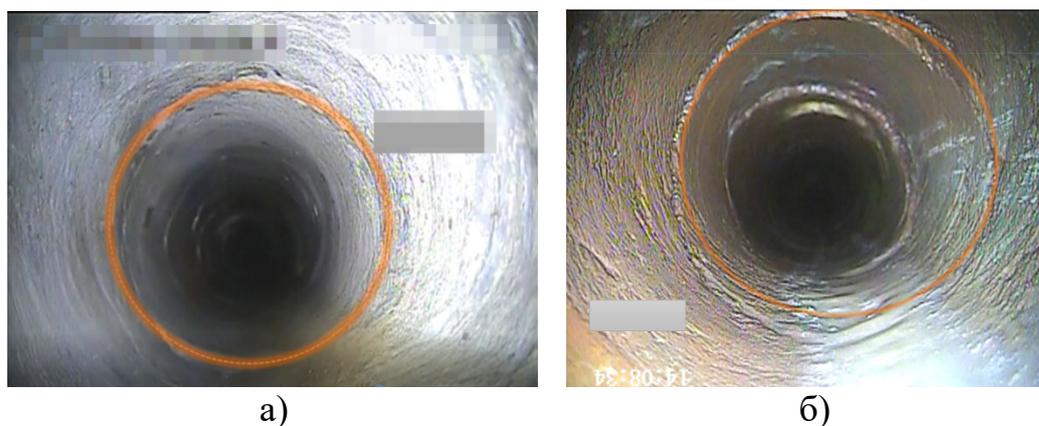


Рис 2. Поперечные природные трещины в скважинах: БСЗ-1 (а); БСЗ-2 (б)

### Результаты экспериментов

Гидрораскрытие трещин выполнялось измерительным зондом с короткой базой межпакерного интервала (не более двух диаметров скважины), который размещался на выбранных участках. На рис. 3 приведена одна из диаграмм «давление – время», полученная в ходе раскрытия природной трещины в скважине БСЗ-1. Результаты замеров по обеим скважинам представлены в табл. 1.

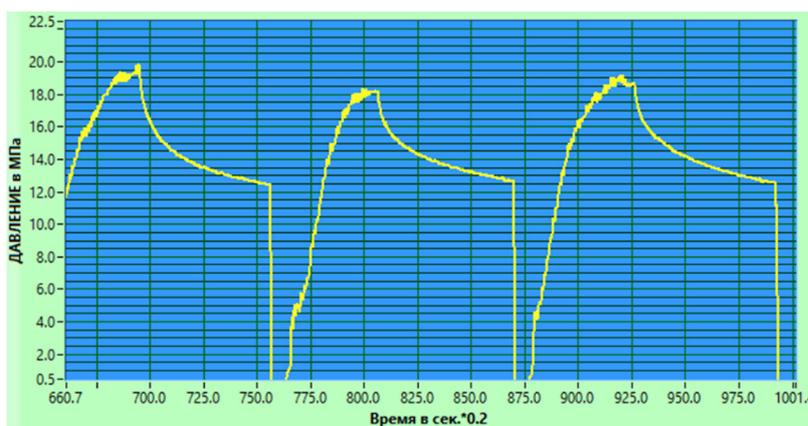


Рис. 3. Экспериментальная диаграмма «давление-время» (скважина БСЗ-1)

## Результаты экспериментов по раскрытию природных трещин

Координаты эксперимента		Давление запираия $P_s$ , МПа		
		1-ое нагружение	2-ое нагружение	3-е нагружение
№ скваж.	$L$ , м	$P_s'$	$P_s''$	$P_s'''$
БСЗ-1	9	15,55	16,2	15,53
БСЗ-2	8	19,8	19,2	20,2

Чтобы применить решение, предложенное в методике [9], рассмотрим схему эксперимента на станции БСЗ, которая приведена на рис. 4. Ранее установлено, что азимут действия максимального горизонтального напряжения на станции БСЗ совпадает с направлением орта (лежит в плоскости ортогональной оси выработки). Отклонение скважины БСЗ-2 от направления действия  $\sigma_{гор}$  составляет  $2^0$ , поэтому в расчетах примем  $\sigma_{гор}$  равным среднему значению давления запираия  $P_2=19.7$  МПа, полученному экспериментально в скважине БСЗ-2 (см. табл. 1).

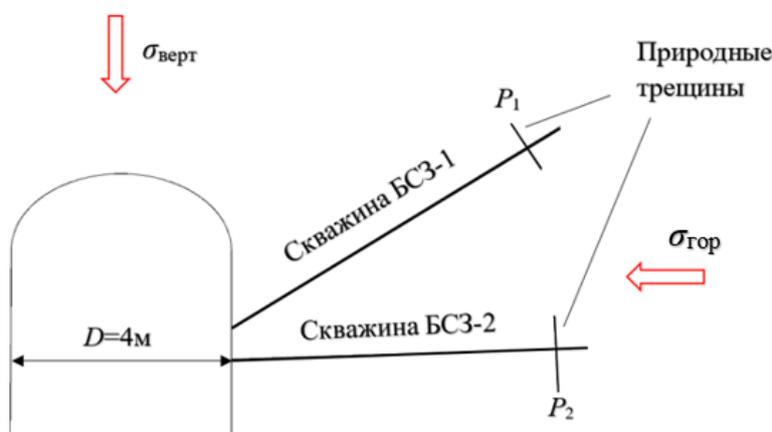


Рис. 4. Расчетная схема эксперимента на замерной станции БСЗ

Используя методику [9], рассчитаем величину нормального напряжения  $P_1^*$  к плоскости трещины и сравним с усредненным значением давления запираия  $P_1$ , полученным экспериментально при замерах в скважине БСЗ-1:

$$P_1^* = \frac{\sigma_{гор} + \sigma_{верт}}{2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r_1^2}\right) + \frac{\sigma_{гор} - \sigma_{верт}}{2} \left(1 - 4 \frac{r_0^2}{r_1^2} + 3 \frac{r_0^4}{r_1^4}\right) \cos(2 * \alpha_1), \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  – угол между горизонталью и осью скважины БСЗ-1;  $r_0$  – радиус выработки;  $r_1$  – расстояние от центра выработки до природной трещины.

В результате расчета получаем  $P_1^*=16.83$  МПа. Сравнение с экспериментальными замерах в скважине БСЗ-1 (среднее значение давления запираия

$P_1=15.76$  МПа) показывает расхождение результатов на 6,8 %. Учитывая, что дополнительную погрешность могла внести неточность задания  $\sigma_{\text{верт}}$ , можно говорить о хорошей сходимости экспериментальных данных и численного расчета. Это подтверждает возможность использования данных по гидрораскрытию природных ортогональных оси скважины трещин для определения компонент действующих в массиве напряжений по предложенной методике направленного гидроразрыва в трех разноориентированных скважинах.

### *Заключение*

В ходе экспериментальных работ, выполненных на Риддер-Сокольном руднике ТОО «Казцинк» с использованием комплекса «Гидроразрыв», установлено, что нахождение в скважинах трещин ортогональной направленности и их раскрытие может явиться альтернативой нарезанию поперечных щелей при экспериментальном определении компонент действующих напряжений по методике направленного гидроразрыва в разноориентированных измерительных скважинах.

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

### 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. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Леонтьев А. В., Попов С. Н. Опыт практического применения измерительного гидроразрыва. М: Горный журнал. –2003. – № 3. – С. 37-43.
7. Кю Н. Г. Оценка напряженно-деформированного состояния породного массива по его реакции на силовое воздействие // Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. Рос. акад. наук Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела [и др.] – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – С. 348-359.
8. Сердюков С. В., Курленя М. В., Патугин А. В. К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // ФТПРПИ. – 2016. – № 6 – С. 1-10.
9. Рубцова Е. В., Скулкин А. А. Развитие методических основ измерительного гидроразрыва // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 5. – С. 188-191.

10. Рубцова Е. В., Скулкин А. А. О выполнении измерительных гидроразрывов в соляных породах на подземных рудниках Верхнекамского месторождения // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – Новосибирск: ИГД СО РАН. – 2017, – Т. 4, № 2. – С. 270–274.
11. Леконцев Ю. М., Леонтьев А. В. Устройство для создания инициирующих щелей в стенках солевых скважин // *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. 181-184.
12. Cornet F. H., Valette B. In situ stress determination from hydraulic injection test data // *J. Geophys. Res.* – 1984. – Vol. 89 – P. 11527-11537.
13. Cornet F. H. Stress determination from hydraulic tests on preexisting fractures – HTPF method // *Proc. Int. Symp. on rock stress measurement.* – Lulea: CENTEK. Publishers – 1986. – P. 301-312.
14. 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.

© А. А. Скулкин, Е. В. Рубцова, 2023