

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЕДЕНИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ МЕТОДОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА**

*Александр Александрович Скулкин*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383) 205-30-30, доб. 337, e-mail: chuppt@yandex.ru

Представлен опыт измерения напряженного состояния массива горных пород на Таштагольском железорудном месторождении и результат напряжений, действующих в наведенном поле вблизи 10 орта на глубине 800 м от дневной поверхности (горизонт -350), используя методом измерительного гидроразрыва. На замерной станции определены зоны концентраций напряжений вокруг горной выработки.

**Ключевые слова:** измерительный гидроразрыв, зонд, напряжённое состояние, скважина, трещина, горная выработка

## **EXPERIMENTAL DETERMINATION OF STRESS PARAMETERS IN THE MINING FIELD**

*Alexander A. Skulkin*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, Mining Information Science Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 337, e-mail: chuppt@yandex.ru

The experience of measuring the stress state of the rock mass at the Tashtagol iron ore deposit and the result of stresses acting in the induced field in the vicinity of 10 orts at a depth of 800 m from the daily surface (horizon -350) is presented using the method of measuring hydraulic fracturing. Stress concentration zones around the mine are determined at the measuring station.

**Keywords:** hydraulic fracturing, rock pressure, measure borehole, probe, stress state, crack, mine

### ***Введение***

Несмотря на сложные горно-геологические условия, связанные с большой глубиной отработки, наличие тектонических зон и удароопасности, Таштагольское месторождение имеет приоритетное значение для металлургической отрасли Кузбасса.

На руднике Таштагольский добычные работы ведутся на глубинах свыше 700 м. В связи с этим проводится комплекс работ по геомеханическому обоснованию выемки запасов. Для этого необходимы данные о текущем состоянии массива горных пород. Первые эксперименты по определению напряжений на Таштагольском месторождении выполнены в 1962 - 1968 гг. на глубинах 233 - 410 м от поверхности Земли в выработках, пройденных по рудной залежи, а также во

вмещающих породах (сиениты, сланцы) [1-11]. Применялся метод торцевой разгрузки и метод Н. Хаста. В данных экспериментах впервые установлен факт превышения горизонтальными напряжениями вертикальной компоненты в 1,5 - 2,0 раза.

В последние годы силовое поле в области рудников Горной Шории подверглось воздействию двух крупных динамических событий – Кочуринского (5.02.1988 г.) и Чуйского (27.09.2003 г.) землетрясений [12].

Под влиянием состоявшихся землетрясений возможно изменение направления действия тектонических сил в области залегания месторождения, поле которых обычно менее однородно по сравнению с гравитационным. Во взаимодействии с гравитационными и локальными полями напряжений тектонические воздействия создают новые более сложные поля напряжений. Ввиду того, что новейших данных по инструментальному контролю напряжений в массиве в подземных условиях рудника «Гаштагол», относящихся к периоду последнего 30-летия нет, возникает потребность в выполнении очередного цикла экспериментальных наблюдений. В современных условиях они должны являться составной частью геомеханико-геодинамического мониторинга [13,14], учитывать специфику контролируемого объекта как нелинейной открытой самоорганизующейся системы с формирующимися определенным образом энергонасыщенными очаговыми зонами.

Сведения о напряженном состоянии породного массива необходимы для принятия правильных решений при проектировании и строительстве подземных сооружений, а также при отработке месторождений полезных ископаемых. На сегодняшний день среди способов экспериментального определения напряженного состояния породных массивов своей высокой универсальностью выделяется метод измерительного гидроразрыва пород в скважине [15, 16]. Ее характеризуют два отличительных признака: размер исследуемого (в единичном опыте) объема горной породы и возможность применения в глубоких скважинах (на больших расстояниях от наблюдателя до исследуемого участка массива).

В настоящей работе приведены результаты экспериментального определения наведенного поля напряжений в породном массиве вблизи района очистных работ (в 10-м орте на горизонте -350) методом измерительного гидроразрыва.

### ***Методы и материалы***

Исследования велись по классической схеме, в которой определение напряжений по данным гидроразрыва основано на предположении, что ось скважины ориентирована в направлении одного из главных напряжений исходного поля (обычно за главное принимают вертикальное направление) [17].

Для определения природного поля, участки для контроля действующих в массиве напряжений, а также места замерных станций должны находиться на максимальном удалении от зоны очистных работ. Конструкция замерной станции предусматривает проведение не менее трех скважин диаметром 76 мм глубиной до 15 м. Место расположения замерной станции было выбрано в непосредствен-

ной близости от района ведения очистных работ, что покажет нам не природное поле напряжений, а действующее в окрестности замерной станции.

На замерной станции выбуриваются ортогональные скважины. Проводится обследование поверхности стенок скважины. Предпочтительно в торцевой части скважины устанавливается измерительный зонд и выполняется тест гидроразрыва. В процессе нагружения стенок скважины с помощью регистратора производится запись «Р – t» диаграммы (диаграмма изменения Давления в системе от Времени). Фиксируется критическое давление флюида в момент гидроразрыва и давление его стабилизации после прекращения подачи флюида. Давление нагнетания сбрасывается до нулевого значения, процесс нагружения стенок скважины повторяется 2 – 3 раза с регистрацией в каждом случае «Р – t» диаграммы.

Далее используется методика [18], в которой формулы для расчета компонент действующих напряжений по данным разно ориентированных скважин подбираются в зависимости от соотношения вертикальной и горизонтальных составляющих поля напряжений. По параметрам гидравлического теста определяют значение меньшей и рассчитывают значение большей горизонтальной компонент действующих напряжений. Для определения меньшей компоненты используют метод, полученный в [19, 20].

В результате анализа производственной обстановки было выбрано наиболее подходящее место возможного размещения замерных станций (рис. 1).

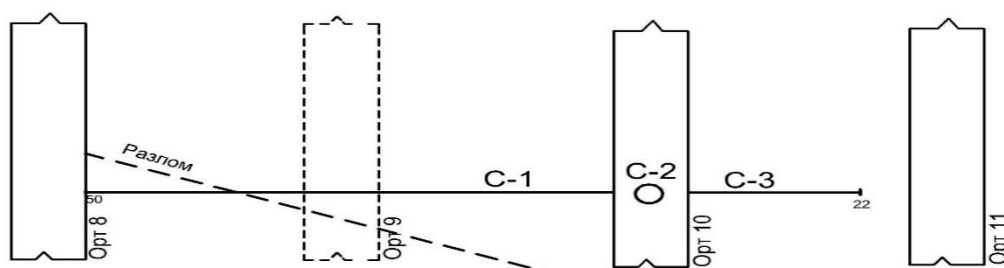


Рис. 1. Схема расположения замерных скважин.

Замерная станция № 1 находится в Орте № 10 на горизонте -350 м и включает в себя три скважины, где скважины С-1 и С-3 направлены в левый и правый борт выработки горизонтально, а С-2 - вертикально вниз. Все скважины пройдены по магнетитовой руде.

В классическом варианте методики измерительного гидроразрыва предполагается использование данных по трем ортогональным скважинам. Так как не удалось подобрать точки, где возможно проведение трех ортогональных скважин, была принята попытка получить значения поля напряжений исходя из данной конфигурации.

Для натуральных экспериментов применялся измерительный зонд с четырьмя пакерующими элементами (рис. 2). В зонде предусмотрено два гидроцилиндра, с помощью которых производится их осевое сжатие. Имелась возможность из-

менять протяженность межпакерного пространства путем замены центральной части несущего стержня. При выполнении тестов гидроразрыва размер межпакерного пространства составлял 5-6 диаметров скважины. Для беспрепятственной досылки устройства в измерительную скважину диаметром 76 мм зонд был оснащен направляющими пластинами.

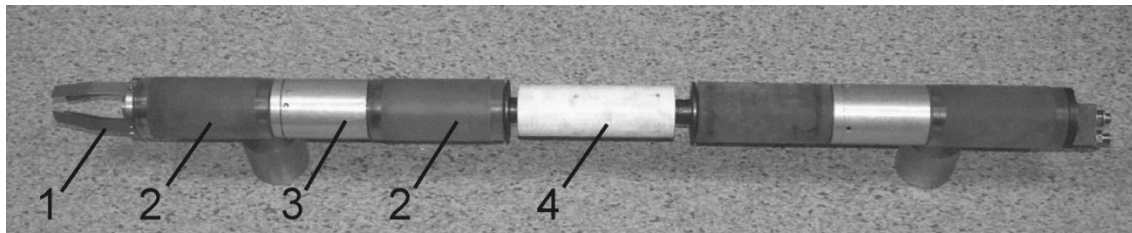


Рис. 2. Общий вид измерительного зонда с четырьмя пакерами:

1 – направляющие пластины; 2 – полиуретановые пакеры; 3 – гидроцилиндры; 4 – втулка для заполнения межпакерного пространства

При выполнении тестов гидроразрыва регистрировались следующие параметры процесса:  $P_r$  – давление гидроразрыва;  $P_s$  – давление запираения при гидроразрыве;  $P_r'$  – давление раскрытия трещины разрыва при повторном нагружении;  $P_s''$  – давление запираения при повторном нагружении;  $P_r''$  – давление раскрытия трещины при третьем нагружении;  $P_s'''$  – давление запираения при третьем нагружении;

На замерной станции выполнено 17 тестов гидроразрыва в 3 скважинах. Журнал наблюдений при выполнении тестов гидроразрыва приведен в таблице 1, а результаты обработки «P– t» диаграмм – в таблице 2.

В ходе испытаний во всех скважинах не удалось создать трещину, так как прочность магнетитовой руды на разрыв превышает разрешающую способность комплекса (>60 МПа). Вследствие этого было принято решение о нахождении природных трещин в скважинах и их раскрытии. Трещины искались по выбуренному керну. По обследованному керну были выделены следующие места: в скважине С-1 трещины располагались на глубинах 11, 10, 9, 8.5 м, в скважине С-2 на глубине 11, 7.5, 6, 5.5 м, а в скважине С-3 трещины находятся на глубине 10, 6.5 м.

Журнал наблюдений при выполнении тестов гидроразрыва на замерной станциях № 1 приведен в табл. 1, а результаты обработки P– t диаграмм – в табл. 2.. Ориентация этих трещин относительно оси скважины неизвестна, поэтому можно говорить лишь об оценочных значениях главных напряжений.

Таблица 1

Журнал наблюдений при выполнении тестов гидроразрыва на замерной станции Таштагольского рудника.

Координаты эксперимента		1-е нагружение		2-е нагружение	
№	Расстояние от контура выработки до места гидроразрыва, м	Давление раскрытия трещины, $P'_r$ , МПа	Давление за-пиранья, $P'_s$ , МПа	Давление рас-крытия тре-щины, $P''_r$ , МПа	Давление за-пиранья, $P''_s$ , МПа
С-1	11	14,6	9.9	13.1	9.7
	10	12.4	9.3	11.44	9.3
	9	10.92	10.45	11.76	11.45
	8.5	13.08	12.76	-	-
С-3	10	26.8	18.3	22.45	21
	6.5	41.39	33.95	-	-
С-2	11	50.65	49.6	-	-
	7.5	43.7	42.58	43.12	42.58
	6	37.66	37.44	34.9	34.9
	5.5	36.8	36.7	36.7	33.2

Таблица 2

Значения компонент напряжений, оцененные в экспериментах на Таштагольском руднике.

Индекс измерительной скважины	Расстояние от контура выработки, м	$\sigma_h$ , МПа	$\sigma_{min}$ , МПа	$\sigma_{max}$ , МПа
С-1	11		9.8	
	10		9.3	
	9		10.95	
	8.5		12.76	
С-3	10	21		
	6.5			33.95
С-2	11			49.6
	7.5			42.58
	6			36.17
	5.5			35

### Результаты

В результате обработки  $P - t$  диаграмм установлены следующие значения напряжений, действующих в массиве:  $\sigma_{min} = 9,3 \div 12,76$  МПа;  $\sigma_{max} = 33,95 \div 49,6$  МПа, а  $\sigma_h = 21$  МПа. Данные значения указывают на не равнокомпонентное поле напряжений на замерной станции, где максимальная горизонтальная компонента превышает  $\gamma h$  от 1,6 до 2,36 раз, а минимальная равна  $0,44 \div 0,6$  от вертикальной.

Анализируя полученные значения выявлен рост напряжений при удалении от подошвы выработки вдоль скважины С-2, а для левого борта выработки, вдоль скважины С-1, ситуация обратная. Это свидетельствует о концентрации напря-

жений вокруг выработки. Опираясь на полученные данные возможен выбор различных мер по предотвращению горных ударов таких как: разгрузка массива, выбор оптимальной крепи выработки, оптимальное расположение соседних выработок для минимизации влияния от них.

### *Заключение*

В подземных выработках Таштагольского железорудного месторождения методом измерительного гидроразрыва выполнен цикл экспериментальных исследований. Полученные данные говорят о тектоническом поле напряжений вблизи Орта № 10. Величины полученных напряжений могут служить опорными сведениями и оказаться полезными при решении практических задач, где необходимо учитывать реальное состояние массива в ближней зоне влияния горных выработок. Опыт практического использования измерительного гидроразрыва показал работоспособность метода при контроле напряженно-деформированного состояния массива горных пород не только для определения природного поля, но и для выявления зон концентраций напряжений вокруг выработок.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Batugin S.A. Shamanskaya A. G. Investigation of the stress state of the rock mass by the method of unloading in the conditions of the Tashtagol iron ore deposit // J. Min. Sci.. - 1965. - Vol. 2. - Pp. 28 – 33. [Батугин С.А. Шаманская А. Г. Исследование напряженного состояния массива горных пород методом разгрузки в условиях Таштагольского железорудного месторождения // ФТПРПИ. — 1965. — № 2. — С. 28 - 33.]
2. Egorov P.V., Shamanskaya A.T. Investigation of the stress state of rocks in areas of discontinuities by the method of unloading at the Tashtagol iron ore deposit // Measurement of stresses in the massif of rocks: mater. seminar - Novosibirsk: Science, 1968. - Pp 107 - 114. [Егоров П.В., Шаманская А.Т. Исследование напряженного состояния горных пород в районах разрывных нарушений методом разгрузки на Таштагольском железорудном месторождении // Измерение напряжений в массиве горных пород: матер. семинара - Новосибирск: Наука, 1968. — С. 107 – 114.]
3. Батугин С.А. Пути повышения точности и надежности определения напряжений в массиве горных пород методом разгрузки. / Материалы семинара «Измерение напряжений в массиве горных пород», Новосибирск: «Наука» СО АН СССР, 1968, С. 58-77.
4. Нестеренко Г.Т., Шаманская А.Т., Егоров П.В. Приближенный метод оценки напряженного состояния горных пород / Материалы семинара «Измерение напряжений в массиве горных пород», Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1970, С. 46-49.
5. Бобряков А.П., Крамаренко В.И., Ревуженко А.Ф., Шемякин Е.И. О стрелянии горных пород // ФТПРПИ, 1980, № 5, С. 3-12.
6. Егоров П.В., Шаманская А.Т., Бояркин В.И., Шрепп Б.В. Сравнение двух методов измерения напряжений в горных породах / Материалы семинара «Измерение напряжений в массиве горных пород», Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1970, С. 59-61.
7. Шаманская А.Т. Распределение напряжений вокруг горных выработок, пройденных в крепких скальных породах / Материалы семинара «Измерение напряжений в массиве горных пород», Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1970, С. 91-95.
8. Шрепп Б.В., Бояркин В.И. Изучение проявлений опорного давления на призабойный массив / Материалы семинара «Измерение напряжений в массиве горных пород», Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1970, С. 95-101.

9. Егоров П.В., Шаманская А.Т. Естественное поле напряжений массива пород Горной Шории / *Материалы семинара «Измерение напряжений в массиве горных пород»*, Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1972, С. 140-143.
10. Шрепп Б.В., Бояркин В.И., Свечников В.Ф. Изучение напряженного состояния массива с использованием фотоупругих тензометров и оптических датчиков / *Материалы семинара «Измерение напряжений в массиве горных пород»*, Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1972, С. 221-223.
11. Лапшин Е.М., Шрепп Б.В., Бояркин В.И. и др. Исследование параметров тектонического поля напряжений на глубоких горизонтах Таштагольского месторождения / *Сб научных трудов «Исследование напряжений в горных породах»* – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1985, С. 11-17.
12. Лобанова Т.В. Заключение по результатам геодинамического районирования Таштагольского месторождения с оценкой сейсмической активности при ведении горных работ и соответствия параметров ведения горных работ геодинамической ситуации. – Новокузнецк: ОАО «Восточный научно-исследовательский горнорудный институт» (ОАО ВостНИГРИ), 2010. – 48 с.
13. Линдин Г.Л., Лобанова Т.Ф. Особенности сейсмоактивности Таштагольского месторождения перед горными ударами // *ФТПРПИ*, 2012, № 2, С. 70-79.
14. Курленя М.В., Леонтьев А.В., Беляков В.Г., Ярославцев А.Ф. Фундаментальные и прикладные задачи геомеханического мониторинга // *ФТПРПИ*, 1996, № 2, С. 15-25 (часть 1), № 6, С. 3-18 (часть 2).
15. Y. Mizuta, S. Kikuchi, K. Tokunaga. Studies on Hydraulic Fracturing Stress Measurement Assisted by Water Jet Borehole Slotting. // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* – 1993. – Vol. 30, – No. 7. – pp. 981-984.
16. G. Klee, A. Bunger, G. Meyer, F. Rummel, B. Shen. In Situ Stresses in Borehole-1/South Australia Derived from Breakouts, Core Discing and Hydraulic Fracturing to 2 km Depth. // *Rock Mech. Rock Eng.* (2011). – V 44, No. 5, pp. 531-540.
17. Kurlenya M.V., Leontyev A.V., and Popov S.N., Development of the hydraulic fracturing method for studying the stress state of a rock massif, *J. Min. Sci.* - 1994. - Vol. 1. - Pp. 3 - 20. [Курленя М.В., Леонтьев А.В., Попов С. Н. Развитие метода гидроразрыва для исследования напряженного состояния массива горных пород // *ФТПРПИ*. — 1994. — № 1. — С. 3 – 20.]
18. Leontiev A.V., Popov S.N. Experience of practical application of measuring hydraulic fracturing // *Gornyi Zhurnal.* - 2003. - No. 3. - Pp. 37 – 43. [Леонтьев А.В., Попов С.Н. Опыт практического применения измерительного гидроразрыва // *Горный журнал*. — 2003. — № 3. — С. 37 – 43.]
19. Rubtsova E.V., Skulkin A.A. On the methods of indirect determination of the pressure of closing the crack during measuring hydraulic fracturing // *Interexpo Geo-Siberia.* - 2016. —Т. 2. - No. 3. - Pp. 265 - 269. [Рубцова Е. В., Скулкин А. А. О методах косвенного определения величины давления заклинивания трещины при измерительном гидроразрыве // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. — 2016. —Т. 2. — № 3. — С. 265 – 269.]
20. Рубцова Е.В., Скулкин А.А. Развитие методических основ измерительного гидроразрыва / *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2013. – № 5. – С. 188–191.

© А. А. Скулкин, 2021