



**О ПРИМЕНЕНИИ КОМПЛЕКСА “ГИДРОРАЗРЫВ” ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ  
ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

**Е. В. Рубцова, А. А. Скулкин**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: rubth@misd.ru,  
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Представлен опыт применения усовершенствованного комплекса “Гидроразрыв” при экспериментальном исследовании параметров полей напряжений в условиях Таштагольского рудника и месторождения “Юбилейное” (Республика Казахстан). Рассмотрены варианты размещения замерных станций и технологические особенности при проведении тестов измерительного гидроразрыва. Приведены результаты экспериментальной оценки компонент напряжений, действующих в окрестности выработок.

*Гидроразрыв, измерительно-вычислительный комплекс, выработка, замерная станция, скважина, трещина, компоненты действующих напряжений*

**APPLICATION OF GIDRORAZRYV SYSTEM IN EXPERIMENTAL STRESS ASSESSMENT  
IN THE VICINITY OF UNDERGROUND MINE WORKINGS**

**E. V. Rubtsova and A. A. Skulkin**

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: rubth@misd.ru, Krasnyi pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The experiment of applying the upgraded Gidrorazryv system when studying stress field parameters in the Tashtagol mine and Yubileynoe deposit (Republic of Kazakhstan) is presented. The alternative layouts of measurement stations and the features of experimental hydraulic fracturing stress measurement are discussed. The experimental estimates of stress components in the vicinity of underground mine workings are presented.

*Hydraulic fracturing, measuring and computing system, mine working, measurement station, borehole, fracture, components of effective stresses*

В мировой практике геомеханических исследований значительная роль отводится экспериментальному определению напряжений, действующих в массиве горных пород. Одним из известных способов их определения является метод измерительного гидроразрыва [1–7], работы по практической реализации которого ведутся в ИГД СО РАН с середины 1980-х годов. Для этих целей разработан измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) “Гидроразрыв” [8]. Технические средства в составе комплекса постоянно совершенствуются с учетом опыта его применения в подземных условиях и современных возможностей информационных технологий.

Основные направления модернизации комплекса, осуществляемые в последние годы:

- разработка новых конструктивных схем и способов управления измерительным зондом, обеспечивающих повышение надежности его работы и позволяющих облегчить монтаж оборудования, особенно на значительных расстояниях от контура выработки [9];
- развитие программно-технических средств с целью повышения точности обработки информации, уменьшения габаритов и веса устройства преобразования и передачи данных, увеличения времени его непрерывной работы;

— создание беспроводного канала передачи информации от устройства преобразования в компьютер, что упрощает размещение аппаратуры и обеспечивает мобильность при проведении шахтных экспериментов.

В новой комплектации ИВК “Гидроразрыв” использован при исследованиях полей напряжений в условиях калийных рудников Верхнекамского месторождения [10], Таштагольского рудника, на месторождении “Юбилейное” (Республика Казахстан), руднике “Удачный” АК “Алроса”.

В настоящей статье рассмотрены результаты применения усовершенствованного комплекса “Гидроразрыв” в условиях Таштагольского рудника и месторождения “Юбилейное”.

**Опыт применения комплекса “Гидроразрыв” в условиях Таштагольского месторождения.** Экспериментальные работы с использованием комплекса “Гидроразрыв” в подземных выработках Таштагольского железорудного месторождения выполнялись, начиная с 80-х годов прошлого века. В разное время они преследовали в основном цели методического характера. В 2018 г. с помощью усовершенствованного ИВК “Гидроразрыв” проведен анализ параметров поля напряжений в породном массиве на гор. –350 в орте 10 на Таштагольском руднике АО “Евразруда”. Место расположения замерной станции находилось в непосредственной близости от района ведения очистных работ, поэтому речь шла об оценке параметров не природного, а наведенного поля напряжений.

На рис. 1 показано расположение скважин на замерной станции: 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.

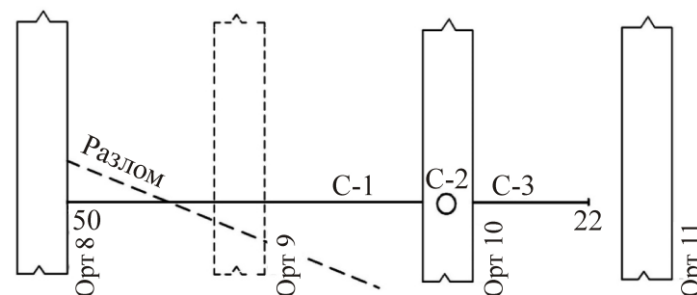


Рис. 1. Схема расположения замерных скважин

В силу производственных условий в исследовании не удалось реализовать классический вариант методики измерительного гидроразрыва, предполагающий использование данных по трем ортогональным скважинам [9, 10]. Поэтому была сделана попытка получить оценки компонент действующих напряжений исходя из представленной конфигурации.

Пробные тесты показали, что разрешающей способности комплекса недостаточно для осуществления разрыва стенок скважины, пройденной по магнетитовой руде. Принято решение о нахождении природных трещин в скважинах и их раскрытии. Положение трещин в стенках скважин определялось по выбуренному керну: в скважине С-1 трещины располагались на расстоянии 11, 10, 9, 8.5 м от устья скважины, в скважине С-2 — на расстоянии 11, 7.5, 6, 5.5 м, в скважине С-3 — на глубине 10, 6.5 м. Поскольку ориентация этих трещин относительно оси скважины неизвестна, можно говорить лишь об оценочных значениях главных напряжений.

Всего на замерной станции выполнено 17 тестов гидроразрыва. Получена следующая оценка компонент напряжений, действующих в массиве, МПа:  $\sigma_{\min} = 9.3-12.8$ ,  $\sigma_{\max} = 33.9-49.6$ ,  $\sigma_H = 21$ . Данные значения указывают на неравнокомпонентное поле напряжений в окрестности выработки, где максимальная горизонтальная компонента превышает вертикальную в 1.6–2.4 раза, а минимальная горизонтальная компонента равна 0.4–0.6 от вертикальной. Выявлен рост напряжений при удалении от подошвы выработки вдоль скважины С-2, для левого борта выработки вдоль скважины С-1 ситуация обратная.

Полученные оценки параметров напряжений могут служить опорными сведениями при решении практических задач, в которых необходимо учитывать реальное состояние массива в ближней зоне влияния горных работ.

**Экспериментальное определение параметров поля напряжений на месторождении “Юбилейное” АО “AltynExCompany” (Республика Казахстан).** Экспериментальные работы на месторождении “Юбилейное” с использованием усовершенствованного комплекса “Гидро-разрыв” проводились в марте 2019 г. В подземных выработках рудника на глубине 500 и 540 м от уровня дневной поверхности были созданы две замерные станции.

В результате анализа производственной обстановки с точки зрения удаления от фронта очистных работ и возможности размещения бурового оборудования для проходки измерительных скважин выбраны следующие места размещения замерных станций: на гор. – 40 м — в нише ремонтно-технического обслуживания (рис. 2а), на гор. – 80 м (рудное тело “Малыш”) — в тупиковом забое (рис. 2б). Рис.2 —

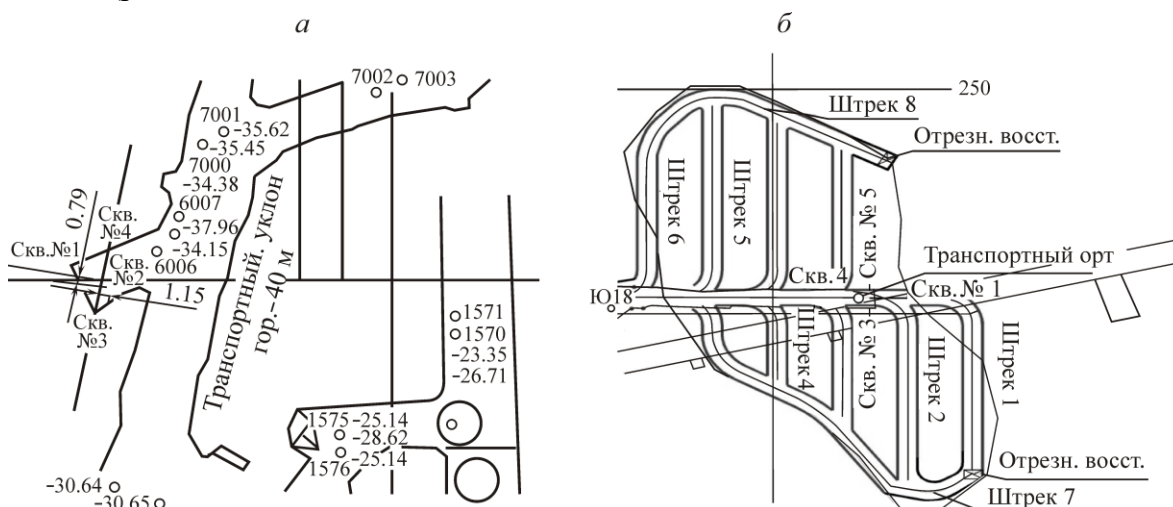


Рис. 2. Расположение замерной станции: а — на гор. – 40 м; б — на гор. 80 м (рудное тело “Малыш”)

На каждой станции было подготовлено по три основных скважины (одна вертикальная и две горизонтальные, ортогональные между собой), а также по одной резервной скважине. Из-за большой трещиноватости массива не удалось подобрать в скважинах интервалы для проведения классического гидроразрыва. Поэтому принято решение использовать для определения компонент напряжений данные повторных раскрытий уже имеющихся трещин.

Всего на двух замерных станциях сделан 21 тест гидроразрыва. Расстояние от контура выработок до мест гидроразрыва составляло в различных скважинах от 6 до 9.7 м. Диаграммы давление – время ( $P-t$  диаграммы), полученные в ходе осуществления экспериментов на гор. – 40 и – 80 м показаны на рис. 4.

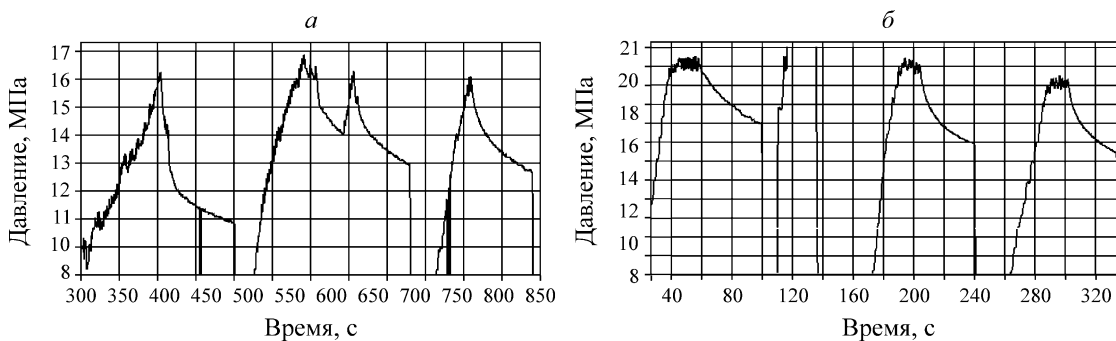


Рис. 4.  $P-t$  диаграммы: а — гор. – 40, скважина № 1, расстояние до контура выработки 8 м; б — гор. – 80, скважина № 3, расстояние до контура выработки 8.2 м

В результате обработки экспериментальных данных на замерной станции –40 м получены следующие значения напряжений, МПа:  $\sigma_{\min} = 14.9 - 15.9$ ,  $\sigma_{\max} = 20.03 - 20.71$ ,  $\sigma_{\text{верт}} = 8.62 - 8.63$ . Горизонтальные напряжения имеют боковой коэффициент, равный 1.15–1.22 и 1.54–1.59, соответственно. Значение вертикальной компоненты напряжения ниже расчетной величины литостатического давления ( $\sigma_h = \gamma h$ , где  $\gamma$  — плотность, осредненная по глубине;  $h$  — глубина), что объясняется карьерной отработкой вышележащих руд. Поскольку станция располагалась в зоне влияния отработки карьера, полученные значения компонент напряжений являются оценкой наведенного поля напряжений.

На замерной станции –80 м, МПа:  $\sigma_{\min} = 18.88 - 18.92$ ,  $\sigma_{\max} = 20.46$ , а  $\sigma_{\text{верт}} = 13.10$ . Величина вертикальной составляющей близка к расчетному значению литостатического давления, горизонтальные напряжения имеют боковой коэффициент, равный 1.34–1.35 и 1.46, соответственно. Поскольку станция находилась вдали от ведения горных работ, значения компонент напряжений можно считать оценкой природного поля напряжений.

### ВЫВОДЫ

На основе опыта проведения тестов измерительного гидроразрыва в подземных условиях и с учетом современных требований, предъявляемых к переносному оборудованию для выполнения шахтных экспериментов усовершенствованы технические средства в составе ИВК “Гидроразрыв. Исследования полей напряжений в условиях Таштагольского месторождения и месторождения “Юбилейное” АО “AltynExCompany” (Республика Казахстан) подтвердили работоспособность новых технических средств в составе комплекса. Результаты экспериментальной оценки напряжений в окрестности выработок с использованием ИВК “Гидроразрыв” могут служить опорными сведениями при обосновании проектных и технологических решений, выборе эффективных и безопасных приемов отработки месторождений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

1. Mizuta Y., Kikuchi S., and Tokunaga K. Studies on Hydraulic Fracturing Stress Measurement Assisted by Water Jet Borehole Slotting, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1993, vol. 30, no. 7, pp. 981–984.
2. Makówka J. Podstawy metody określania naprężeń głównych z wykorzystaniem ukierunkowanego hydroszczelinowania skał (Basis of principal stresses determination method using directional hydraulic hydrofracturing of rocks – in Polish), Prace Naukowe GIG nr 868, Katowice, 2006.
3. Klee G., Bunger A., G. Meyer F., and Rummel B. Shen. In Situ Stresses in Borehole-1/South Australia Derived from Breakouts, CjreDiscing and Hydraulic Fracturing to 2 km Depth, Rock Mech. Rock Eng., 2011, vol. 44, no. 5, pp. 531–540.
4. D 4645-04. Standard Test Method for Determination of the In-Situ Stress in Rock Using the Hydraulic Fracturing Method.
5. Moayed R. Z., Izadi E., and Fazlavi M. In-situ stress measurements by hydraulic fracturing method at Gotvand Dam site, Iran, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 2012, vol. 36, pp. 179–194.
6. Oldenburg C. M., Dobson P. F., Wu Y., and Cook P. J., et al. Hydraulic Fracturing Experiments at 1500 m Depth in a Deep Mine: Highlights from the kISMET Project, Proceeding 42d Workshop On Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 13-15, 2017, SGP-TR-212.
7. Serdyukov S. V., Kurlenya M. V., and Patutin A. V. Hydraulic fracturing for in situ stress measurement, Journal of Mining Science, 2016, no. 6, pp. 6–14. (in Russian) [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.]

8. **Leont'ev A. V., Rubtsova E.V., Lekontsev Yu. M., and Kachal'sky V. G.** Measuring-computing complex “Gidrorazryv”, *Journal of Mining Science*, 2010, no 1, pp. 104–110. (in Russian) [**Леонтьев А. В., Рубцова Е. В., Леконцев Ю. М., Качальский В. Г.** Измерительно-вычислительный комплекс “Гидро-разрыв” // ФТПРПИ. — 2010. — № 1. — С. 104–110.]
9. **Joong-Ho Synn, Chan Park, Yong-Bok Jung, and Choon Sunwoatc.** Integrated 3-D stress determination by hydraulic fracturing in multiple inclined boreholes beneath an underground cavern, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science* 75 (2015), pp. 44–55.
10. **Rubtsova E. V. and Skulkin A. A.** Theoretical framework of hydrofracturing stress measurement, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2013, no. 5, pp. 188–191. (in Russian) [**Рубцова Е. В., Скулкин А. А.** Развитие методических основ измерительного гидроразрыва // ГИАБ. — 2013. — № 5. — С. 188–191.]