

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 622.831.1

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-128-136

ОБОСНОВАНИЕ СХЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ НАПРАВЛЕННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТ ПРИРОДНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Скулкин Александр Александрович,
Панов Антон Владимирович,
Рубцова Екатерина Владимировна,
Мирошниченко Нелли Александровна*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук

* для корреспонденции: mna@misd.ru



Информация о статье

Поступила:

25 мая 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 сентября 2025 г.

Принята к публикации:

30 сентября 2025 г.

Опубликована:

23 октября 2025 г.

Ключевые слова:

скважина, иницирующая
щель, направленный
гидро разрыв, компоненты
поля напряжений, давление
запирания трещины,
численный эксперимент,
мультипликативный шум,
погрешность

Аннотация.

Практическая реализация способов инструментального определения напряжений в массиве горных пород является актуальной задачей. В статье рассмотрен методический подход, позволяющий по данным направленного измерительного гидро разрыва в трех разноориентированных скважинах, проведенных в плоскости ортогональной оси выработки, определять величину и направление главных компонент внешнего поля напряжений. С целью обоснования схем взаимного расположения измерительных скважин проведен анализ погрешностей определения искоемых компонент напряжений: 1) при вариациях углов между скважинами и положения первой скважины относительно заранее неизвестного вектора главной компоненты напряжений; 2) в зависимости от точности направленного бурения скважин. Для оценки возможных погрешностей предложен аналитический алгоритм решения прямой и обратной задачи с зашумлением входных данных. В качестве исходных данных использованы результаты экспериментальных исследований, выполненных с использованием комплекса «Гидро разрыв» в условиях рудников АО «Учалинский ГОК». Установлено, что углы между осями измерительных скважин в плоскости ортогональной направлению выработки должны составлять не менее 30° независимо от ориентации первой скважины относительно предполагаемого действия главного напряжения. При отклонении измерительных скважин от заданных углов в пределах 4° погрешности определения величины главных напряжений и угла между первой скважиной и направлением действия максимальной компоненты не превышают 7% и 1.5° соответственно, что является допустимым при проведении измерительного гидро разрыва в натурных условиях.

Для цитирования: Скулкин А.А., Панов А.В., Рубцова Е.В., Мирошниченко Н.А. Обоснование схемы реализации направленного измерительного гидро разрыва для определения компонент природного поля напряжений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 5 (171). С. 128-136. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-128-136, EDN: PWJMO

Введение

Для обеспечения безопасных условий ведения подземных горных работ требуется информация о геомеханическом состоянии породного массива [1]. Одним из известных методов инструментального контроля

напряжений в окрестности горных выработок является измерительный гидро разрыв, методические основы которого представлены в работах [2-5]. Развитию метода и вопросам его практической реализации посвящены современные исследования зарубежных [6-12] и

русских [13-16] ученых. Отечественной разработкой, предназначенной для оценки параметров природного поля напряжений методом гидроразрыва, является созданный в ИГД СО РАН комплекс «Гидроразрыв» [16]. Комплекс используется в условиях горнодобывающих предприятий, при этом совершенствуются методические и технологические аспекты проведения натурных экспериментов.

Важным этапом реализации измерительного гидроразрыва в условиях подземных рудников является выбор мест заложения и обоснование конструкции замерных станций для выполнения измерительных тестов. При выборе мест заложения станций учитывается удаление зоны экспериментов от фронта очистных работ, отсутствие подработки либо надработки контролируемого участка массива, возможность размещения бурового оборудования. Опыт выполнения экспериментальных работ с использованием комплекса «Гидроразрыв» на отечественных подземных рудниках показывает, что в силу технологических ограничений количество полноценных измерительных скважин на одной замерной станции не превышает трех. Авторами обоснован методический подход [15], который позволяет по данным направленного измерительного гидроразрыва в трех разноориентированных скважинах, проведенных в плоскости ортогональной оси выработки, определять величину и ориентацию главных напряжений.

Предложенная методика была апробирована при экспериментальной оценке параметров поля напряжений соленосных пород на рудниках Верхнекамского месторождения. Для реализации направленного гидроразрыва предварительно с помощью специально разработанных для условий калийных рудников щелеобразователей на стенках измерительных скважин выполнялось нарезание поперечных щелей-концентраторов напряжений [17]. В проведенных исследованиях

природного поля напряжений в условиях рудника ТОО «Казцинк» установлено, что выявление в скважинах ортогональных осей трещин и их раскрытие является альтернативой нарезанию искусственных поперечных инициирующих щелей, что упрощает технологию реализации направленного измерительного гидроразрыва в прочных горных породах [18].

Одним из важных моментов в реализации предложенной методики является обоснование направлений бурения скважин. В связи с этим актуальной задачей является исследование погрешностей определения искомого компонент напряжений при вариациях углов между измерительными скважинами и положения первой скважины относительно заранее неизвестного вектора одного из главных напряжений. Практический интерес представляет также анализ погрешностей определения компонент поля напряжений в зависимости от точности направленного бурения скважин.

Постановка задачи

В предложенной методике [15] при определении напряженного состояния пород вокруг выработки объемная задача сведена к плоской, поскольку один из размеров – длина выработки, значительно больше двух других [19]. Рассматривается выработка, приближенная к круглой форме. Приняты допущения, что форма выработки остается симметричной, влияние от выработки приближенно к влиянию круглого отверстия, среда является однородной.

На Рис. 1 приведена схема реализации методики направленного поинтервального измерительного гидроразрыва, в которой из горной выработки круглого сечения радиусом r_0 проведены три скважины. Взаимное расположение измерительных скважин задается углами β_1 и β_2 . Ориентация векторов главных напряжений p и q неизвестна, при этом принимается, что первая скважина составляет с одним из главных напряжений некоторый,

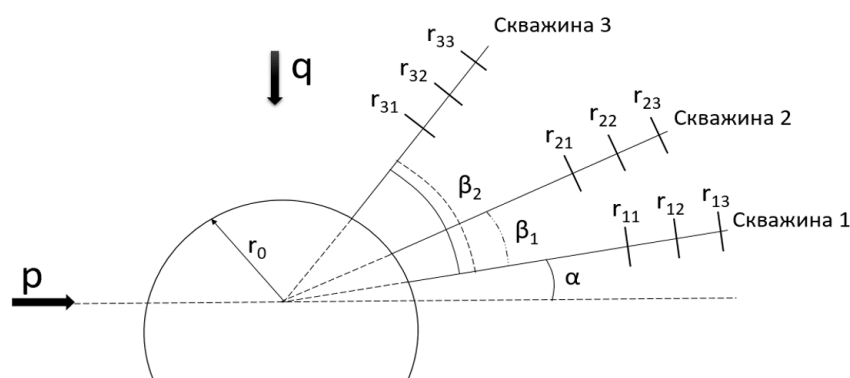


Рис. 1. Схема поинтервального измерительного гидроразрыва с тремя произвольно ориентированными скважинами

Fig. 1. Schematic of interval measurement hydraulic fracturing with three arbitrarily oriented boreholes

заранее неизвестный, угол α . Полагаем, что плоскости инициирующих щелей для измерительного гидроразрыва ортогональны осям скважин и расположены на расстояниях r_{ij} от центра выработки, где i – номер скважины, j – номер площадки инициирующей щели. В целях учета различных вариантов расположения инициирующих щелей в скважинах и усреднения результатов расчета будем рассматривать схему с тремя ортогональными площадками в каждой скважине ($j = 3$).

Нормальное напряжение на площадке, расположенной на окружности радиуса r_i , определяется соотношением [20]:

$$\sigma_i = \frac{p+q}{2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r_i^2}\right) + \frac{p-q}{2} \left(1 - 4 \frac{r_0^2}{r_i^2} + 3 \frac{r_0^4}{r_i^4}\right) \cos 2\theta_i, \quad (1)$$

где θ_i – угол между направлением одного из векторов главных напряжений и осью i -ой скважины.

Для трех произвольно выбранных площадок (по одной площадке в каждой скважине) с учетом (1) получим:

$$\begin{cases} \sigma_1 = Dd_1 + Ee_1 \cos 2\alpha \\ \sigma_2 = Dd_2 + Ee_2 \cos(2\beta_1 + 2\alpha) \\ \sigma_3 = Dd_3 + Ee_3 \cos(2\beta_2 + 2\alpha) \end{cases} \quad (2)$$

где $D = \frac{p+q}{2}$, $E = \frac{p-q}{2}$, $d_i = 1 - r_0^2/r_i^2$,

$e_i = 1 - 4r_0^2/r_i^2 + 3r_0^4/r_i^4$, $i = 1, 2, 3$.

В соответствии с [15] решение системы (2) примет вид:

$$q = D - E, p = D + E, \alpha = \frac{1}{2} \arccos(g_1/E), \quad (3)$$

где

$$D = (\sigma_1 - g_1 e_1)/d_1,$$

$$E = \sqrt{g_1^2 + g_2^2}, \quad \cos 2\alpha = g_1/E,$$

$$g_1 = (c_2 d_1 - \sigma_1 c_1)/(c_3 d_1 - e_1 c_1),$$

$$c_1 = d_2 e_3 \sin 2\beta_2 - d_3 e_2 \sin 2\beta_1,$$

$$c_2 = \sigma_2 e_3 \sin 2\beta_2 - \sigma_3 e_2 \sin 2\beta_1,$$

$$c_3 = e_3 e_2 \sin(2\beta_2 - 2\beta_1),$$

$$g_2 = (g_1 e_2 \cos 2\beta_1 - c_4)/(e_2 \sin 2\beta_1),$$

$$c_4 = \sigma_2 - Dd_2.$$

При реализации предложенной методики нормальное напряжение к плоскости инициирующей щели принимается равным давлению запираения трещины, которое определяется экспериментально при проведении измерительного гидроразрыва. При расчете величины главных напряжений и угла α могут возникнуть погрешности из-за неточности экспериментального определения давления запираения, а также возможных отклонений осей измерительных скважин от заданных углов β_1 и β_2 .

Для оценки возможных погрешностей предложена аналитическая схема решения прямой и обратной задачи с зашумлением входных данных. На первом этапе (прямая задача) на основе данных экспериментальных

исследований задаются исходные величины главных напряжений p и q , угол α , радиусы r_0 , r_{ij} . Схемы расположения измерительных скважин можно варьировать заданием углов β_1 , β_2 . По уравнениям (1) рассчитываются нормальные напряжения σ_{ij} на всех площадках.

Далее на полученные значения σ_{ij} (точное решение) накладывается мультипликативный шум, имитирующий погрешности измерения давления запираения трещин: $\sigma_{ij}^* = \sigma_{ij}(1+\xi)$, где ξ – равномерно распределенная на отрезке $[-A_{err}; A_{err}]$ случайная величина. Амплитуда случайной ошибки A_{err} варьировалась от 2% до 10%.

Аналогично погрешности ориентации скважин задаются наложением мультипликативного шума на параметры β_1 , β_2 : $\beta_i^* = \beta_i(1+\eta)$, где η – случайная величина, равномерно распределенная на отрезке $[-B_{err}; B_{err}]$; B_{err} варьировалась в пределах от 1° до 4°.

На втором этапе решается обратная задача – по выражениям (4) рассчитываются значения p^* , q^* , α^* с учетом наложения шума на входные данные и определяются относительные погрешности δ_p , δ_q и абсолютная погрешность $\Delta\alpha$. Искомые погрешности вычисляются для средних арифметических значений p^* , q^* и α^* по множеству всех комбинаций из трех измерительных площадок (по одной из каждой скважины) (Рис. 1).

На основе численных экспериментов необходимо обосновать схемы взаимного расположения измерительных скважин, а также требования к точности направленного бурения, минимизирующие погрешности определения компонент природного поля напряжений.

Результаты и их обсуждение

В качестве исходных данных для расчета прямой задачи взяты результаты экспериментальных исследований, выполненных с использованием комплекса «Гидроразрыв» в условиях рудников АО «Учалинский ГОК»: $p=19.7$ МПа; $q=12.3$ МПа; $r_0=2$ м; расстояния r_{ij} от кровли выработки до инициирующих щелей принимались равными 6, 8, 10 м (поинтервальный гидроразрыв).

Рассмотрим, как влияет на погрешность определения компонент напряжений величина углов между осями измерительных скважин. Будем полагать $\beta_2=2\beta_1$, тогда углы между осями скважин будут равны β_1 . На Рис. 2 приведены относительные погрешности δ_p и δ_q при вариации β_1 от 15° до 45°, в расчетной схеме угол α принят равным 20°. Как видно из графиков, сближение скважин (уменьшение острых углов между ними) приводит к резкому росту погрешности определения искомых компонент напряжений. При максимальном уровне шума $A_{err} = 10\%$ относительные погрешности определения величин p и q не превышают 10%, если углы

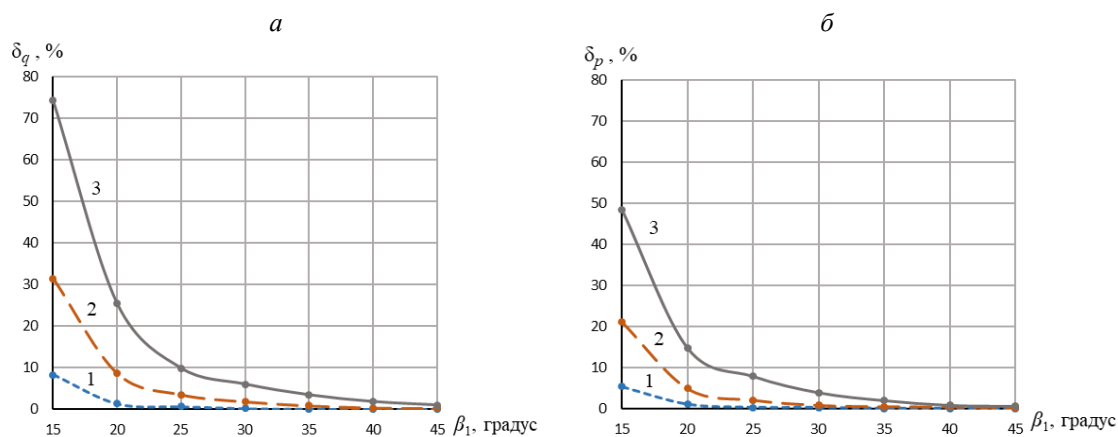
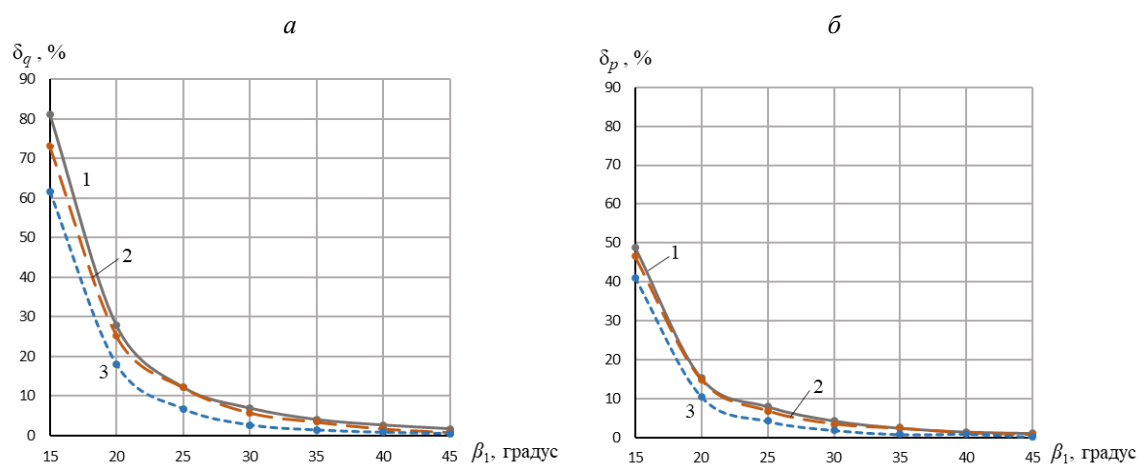


Рис. 2. Зависимость погрешностей определения компонент напряжений q (а) и p (б) от величины угла β_1 между осями измерительных скважин при амплитудах A_{err} случайной ошибки измерения давления заклипания трещин: 1 – $A_{err} = 2\%$; 2 – $A_{err} = 5\%$; 3 – $A_{err} = 10\%$

Fig. 2. Dependence of the errors in determining the stress components q (a) and p (b) on the angle β_1 between the measurement borehole axes at different amplitudes A_{err} of random fracture closure pressure measurement errors:

1 – $A_{err} = 2\%$; 2 – $A_{err} = 5\%$; 3 – $A_{err} = 10\%$



6

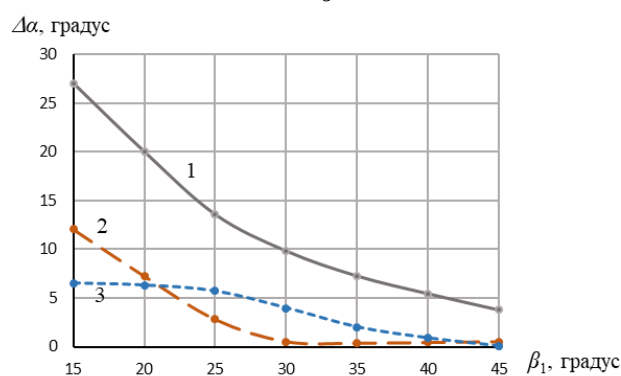


Рис. 3. Зависимость погрешностей определения компонент напряжений q (а), p (б) и угла α (в) от величины угла β_1 между осями скважин при вариациях угла бурения первой скважины: 1 – $\alpha = 5^\circ$; 2 – $\alpha = 20^\circ$; 3 – $\alpha = 45^\circ$

Fig. 3. Dependence of the errors in determining the stress components q (a), p (b), and angle α (c) on the angle β_1 between borehole axes for variations in the drilling angle of the first borehole: 1 – $\alpha = 5^\circ$; 2 – $\alpha = 20^\circ$; 3 – $\alpha = 45^\circ$

между осями измерительных скважин принимаются равными 25° и более. Расчеты показывают, что абсолютная погрешность определения угла α при этом не превышает 3° .

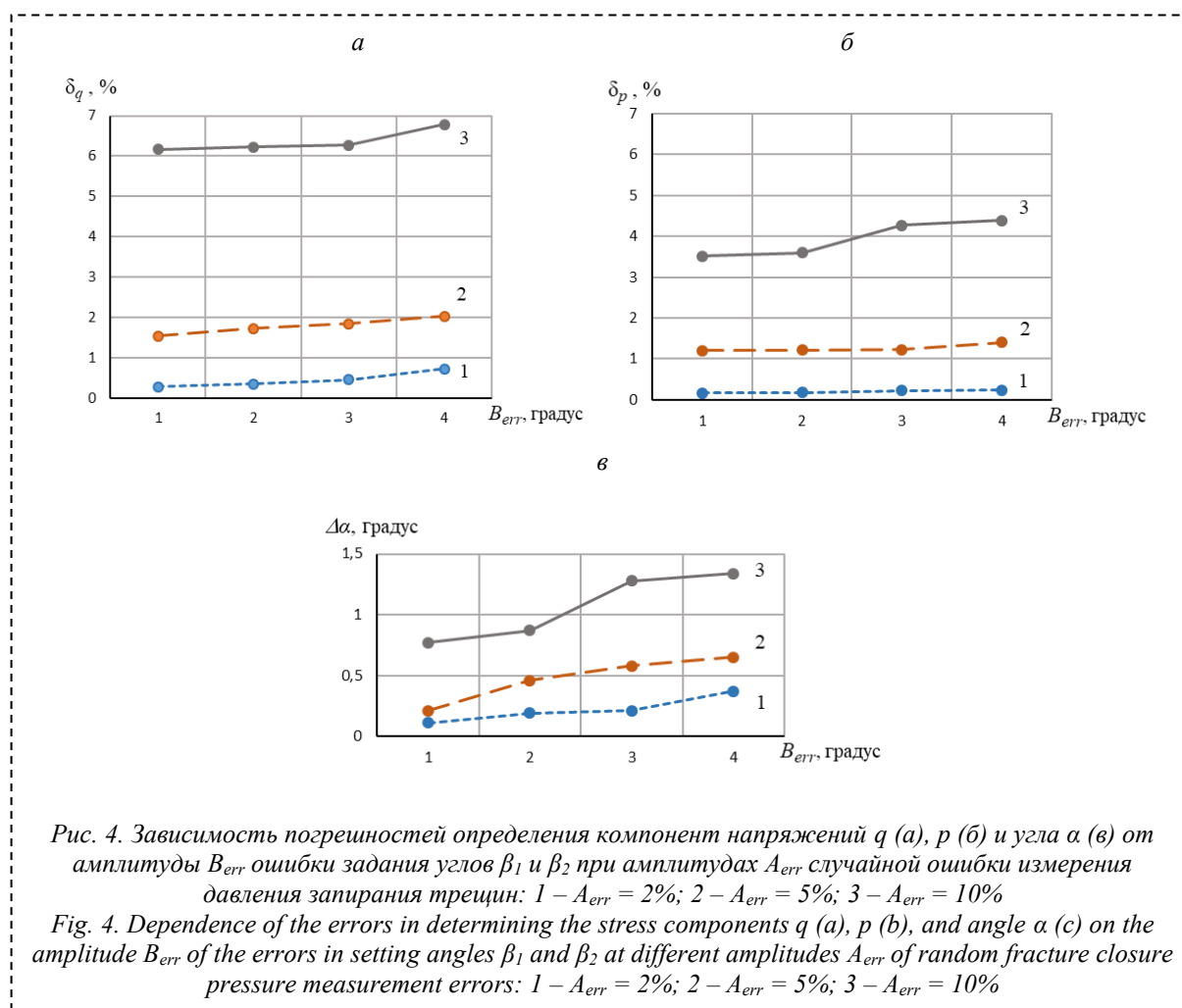
Поскольку при выполнении натурных экспериментов направление действия главных напряжений заранее не известно, рассмотрим, какое влияние на величину погрешностей от изменения углов между осями скважин будет оказывать направление бурения первой скважины. На Рис. 3 продемонстрированы результаты расчетов погрешностей δ_p , δ_q и $\Delta\alpha$ при максимальном шуме $A_{err} = 10\%$ и направлениях бурения первой скважины $\alpha = 5^\circ$, 20° , 45° . При небольших значениях угла α и малых углах между осями измерительных скважин погрешности определения величины и направления главных напряжений будут недопустимо велики. Как видно из графиков, погрешности δ_p , δ_q не превышают 10% , а погрешность $\Delta\alpha$ находится в пределах 10° при углах между осями измерительных скважин более 30° независимо от направления бурения первой скважины. Таким образом, в схемах реализации предложенной методики измерительного гидроразрыва при изначально неизвестном направлении действия главных

напряжений углы между осями измерительных скважин должны составлять не менее 30° .

Численными экспериментами определены погрешности, обусловленные неточностью направленного бурения измерительных скважин (отклонения углов β_1 и β_2 от заданных значений). На Рис. 4 приведены погрешности δ_p , δ_q , $\Delta\alpha$ в зависимости от амплитуд случайного шума B_{err} и A_{err} для схемы: $\beta_1 = 30^\circ$, $\beta_2 = 60^\circ$, $\alpha = 20^\circ$. Как видим, максимально возможные погрешности определения p и q при отклонениях от заданного направления бурения скважин в пределах 4° не превышают 7% , погрешность определения угла α составляет при этом не более 1.5° , что вполне допустимо в натурных экспериментах.

Выводы

В целях обоснования схем практической реализации методики направленного измерительного гидроразрыва на основе численных экспериментов дана оценка возможных погрешностей определения величины и направления главных компонент природного поля напряжений при различных схемах взаимного расположения измерительных скважин с учетом погрешности экспериментальной оценки давления заклинивания трещин при гидроразрыве и неточности



направленного бурения скважин.

Установлено, что независимо от ориентации первой скважины относительно предполагаемого действия главного напряжения в плоскости ортогональной направлению выработки, углы между осями измерительных скважин должны составлять не менее 30°.

Отклонение измерительных скважин от заданных углов в пределах 4° при направленном бурении не приводит к существенным ошибкам при определении величины и направления главных напряжений, поэтому указанные отклонения можно считать допустимыми при проведении измерительного гидроразрыва в природных условиях.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. отдние, Ин-т горного дела. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2018. 549 с.
2. Haimson D.C. and Fairhurst C. Initiation and extension of hydraulic fractures in rock. // *Sos. Petr. Engrg. J.* 1967. № 7. Pp. 310–318.
3. Cornet F. H., Valette B. In Situ Stress Determination From Hydraulic Injection Data. // *Journal of Geophysical Research.* Vol. 89. № B13. 1984. Pp. 11.527–11.537.
4. Aggson J. R., Kim K. Analysis of Hydraulic Fracturing Pressure Histories: A Comparison of Five Methods Used to Identify Shut-in Pressure // *Int. J. Rock Mech. Min. sci.* 1987. Vol. 24. № 1. Pp. 75–80.
5. 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. Pp. 1012–1020.
6. 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 3D stress determination by hydraulic fracturing in multiple inclined boreholes beneath an underground cavern // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2015. № 75. Pp. 44–55.
7. Zhou L., Li L., Xia B. W., Yu B. Fracture pattern and influencing factors of guided hydraulic fracturing with radial slot and well borehole // *J. China Coal Soc.* 2022. № 47. Pp. 1559–1570. DOI: 10.13225/J.CNKI.JCCS.2021.0736.
8. Zhao Y., Zhang Y., Yang H. [et al.] Experimental study on relationship between fracture propagation and pumping parameters under constant pressure injection conditions // *Fuel.* 2022. № 307. 121789. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121789.
9. 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). Pp. 517–542.
10. Jiang Y., Liang W., Cai T. [et al.] Fracture growth and acoustic emission response in natural coal-rock blocks with different stress, fracturing medium and injection rates // *J. Pet. Sci. Eng.* 2023. № 220. 111228. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111228.
11. Li Q., Qian Y., Hu Q. [et al.] Acoustic emission response mechanism of hydraulic fracturing in different coal and rock: a laboratory study // *Rock Mech. Rock Eng.* 2022. № 55. Pp. 4657–4672. DOI: 10.1007/s00603-022-02889-6.
12. Qin Y., Guo T., Ding H. [et al.] Mechanism of inter-well hydraulic fracture interference in the primary horizontal well pattern // *Geoenery Sci. Eng.* 2024. № 41. 213165. DOI: 10.1016/j.geoen.2024.213165.
13. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты / Отв. ред. М. Д. Новопашин. Новосибирск : ИГД СО РАН. 2008. 449 с.
14. 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.
15. Рубцова Е. В., Скулкин А. А. Развитие методических основ измерительного гидроразрыва // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2013. № 5. С. 188–191.
16. Рубцова Е. В., Скулкин А. А. О применении комплекса «Гидроразрыв» при экспериментальной оценке напряжений в окрестности горных выработок // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* 2021. Т.8. № 2. С. 118–122. <https://doi.org/10.15372/FPVGN2021080218>.
17. 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.
18. Скулкин А. А., Рубцова Е. В. О проведении измерительного гидроразрыва в скважинах с природными трещинами // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2023. XIX Междунар. науч. конгр.: Междунар. научная конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных*

ископаемых. Экономика. Геоэкология». Новосибирск : СГУГиТ, 2023. № 1. С. 236–242. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-2-1-236-242.

19. Дементьев А. Д., Назаров Л. А.,

Назарова Л. А. Прикладные задачи теории упругости // Новосибирск : Изд. НГАУ, 2002. 224 с.

20. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. Москва : «Наука», 1975. 576 с.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Скулкин Александр Александрович, младший научный сотрудник, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54), e-mail: chupptt@yandex.ru

Панов Антон Владимирович, младший научный сотрудник, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54), e-mail: anton-700@yandex.ru

Рубцова Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54), e-mail: rubth@misd.ru

Мирошниченко Нелли Александровна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54), e-mail: mna@misd.ru

Заявленный вклад авторов:

Скулкин Александр Александрович – сбор и анализ данных, выводы.

Панов Антон Владимирович – обзор литературы, написание текста.

Рубцова Екатерина Владимировна – постановка исследовательской задачи, написание текста.

Мирошниченко Нелли Александровна – численные эксперименты, графическое оформление результатов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

JUSTIFICATION OF THE SCHEME FOR IMPLEMENTING DIRECTIONAL MEASUREMENT HYDRAULIC FRACTURING TO DETERMINE COMPONENTS OF THE NATURAL STRESS FIELD

Alexander A. Skulkin, Anton V. Panov,
Ekaterina V. Rubtsova, Nelly A. Miroshnichenko *

Chinakal Institute of Mining, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences

* for correspondence: mna@misd.ru



Article info

Received:

25 May 2025

Accepted for publication:

22 September 2025

Accepted:

30 September 2025

Published:

Abstract.

The practical implementation of methods for the instrumental determination of stresses in rock masses remains a pressing challenge. This article presents a methodological approach that utilizes data from directional measurement hydraulic fracturing in three differently oriented boreholes drilled in a plane orthogonal to the excavation axis. This approach enables the determination of the magnitude and direction of the principal components of the external stress field. To justify the schemes for the mutual arrangement of measurement boreholes, an analysis of errors in determining the target stress components was conducted under the following conditions: 1) variations in angles between boreholes and the position of the first borehole relative to the a priori unknown vector of the principal stress component; 2) dependence on the accuracy of directional drilling. An analytical algorithm for solving forward and inverse problems with noisy input data was proposed to assess potential errors. The algorithm was tested using experimental data obtained

23 October 2025

Keywords: borehole, initiation fracture, directional hydraulic fracturing, stress field components, fracture closure pressure, numerical experiment, multiplicative noise, error.

from the "Gidrorazryv" complex at the mines of JSC "Uchalinsky GOK". It was established that the angles between the axes of the measurement boreholes in the plane orthogonal to the excavation direction should be at least 30°, regardless of the orientation of the first borehole relative to the assumed principal stress direction. Deviations of the measurement boreholes from the specified angles within 4° result in errors not exceeding 7% in the magnitude of the principal stresses and 1.5° in the angle between the first borehole and the direction of the maximum stress component. These errors are deemed acceptable for conducting measurement hydraulic fracturing under field conditions.

For citation: Skulkin A.A., Panov A.V., Rubtsova E.V., Miroshnichenko N.A. Justification of the scheme for implementing directional measurement hydraulic fracturing to determine components of the natural stress field. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 5(171):128-136. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-128-136, EDN: PWJMOL

REFERENCES

1. Oparin V.N., Zhuravkov M.A., Potapov V.P., Kalenitsky A.A. [et al.] *Geomechanical Fields and Processes: Experimental-Analytical Studies on the Formation and Development of Focal Zones of Catastrophic Events in Mining-Technical and Natural Systems*. Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Institute of Mining, Novosibirsk: Publishing House of SB RAS; 2018. 549 p.
2. Haimson B.C., Fairhurst C. Initiation and extension of hydraulic fractures in rock. *Soc Pet Eng J*. 1967; 7:310–318.
3. Cornet F.H., Valette B. In situ stress determination from hydraulic injection test data. *J Geophys Res*. 1984; 89(B13):11527–37.
4. Aggson J.R., Kim K. Analysis of hydraulic fracturing pressure histories: a comparison of five methods used to identify shut-in pressure. *Int J Rock Mech Min Sci*. 1987; 24(1):75–80.
5. 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 (HTPF). *Int J Rock Mech Min Sci*. 2003; 40:1011–20.
6. Synn J.H., Park C., Jung Y.B., Sunwoo C., Kim K.S., Choi S.Y. [et al.] Integrated 3D stress determination by hydraulic fracturing in multiple inclined boreholes beneath an underground cavern. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2015; 75:44–55.
7. Zhou L., Li L., Xia B.W., Yu B. Fracture pattern and influencing factors of guided hydraulic fracturing with radial slot and well borehole. *J China Coal Soc*. 2022; 47:1559–70. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2021.0736.
8. Zhao Y., Zhang Y., Yang H. [et al.] Experimental study on relationship between fracture propagation and pumping parameters under constant pressure injection conditions. *Fuel*. 2022; 307:121789. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121789.
9. Krietsch H., Gischig V., Evans K., Doetsch J., Dutler N.O., Valley B. [et al.] Stress measurements for an in situ stimulation experiment in crystalline rock: integration of induced seismicity, stress relief and hydraulic methods. *Rock Mech Rock Eng*. 2019; 52(2):517–42.
10. Jiang Y., Liang W., Cai T. [et al.] Fracture growth and acoustic emission response in natural coal-rock blocks with different stress, fracturing medium and injection rates. *J Pet Sci Eng*. 2023; 220:111228. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111228.
11. Li Q., Qian Y., Hu Q., [et al.] Acoustic emission response mechanism of hydraulic fracturing in different coal and rock: a laboratory study. *Rock Mech Rock Eng*. 2022; 55:4657–72. DOI: 10.1007/s00603-022-02889-6.
12. Qin Y., Guo T., Ding H. [et al.] Mechanism of inter-well hydraulic fracture interference in the primary horizontal well pattern. *Geoenergy Sci Eng*. 2024; 41:213165. DOI: 10.1016/j.geoen.2024.213165.
13. Modern geodynamics of the upper lithosphere rock mass: origins, parameters, impact on objects. Novopashin M.D., editor. Novosibirsk: IGD SO RAN; 2008. 449 p.
14. Serdyukov S.V., Kurlenya M.V., Patutin A.V. On the issue of stress measurement in rock mass by hydraulic fracturing method. *Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh* [Physical-Technical Problems of Mineral Development]. 2016; 6:1–10.
15. Rubtsova E.V., Skulkin A.A. Development of methodological foundations of measurement hydraulic fracturing. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2013; 5:188–91.
16. Rubtsova E.V., Skulkin A.A. On the application of the "Hydrofrac" complex for experimental stress evaluation in the vicinity of mine workings. *Fundamentalnye i Prikladnye Voprosy Gornykh Nauk* [Fundamental and Applied Problems of Mining Sciences]. 2021; 8(2):118–22. DOI: 10.15372/FPVGN2021080218.
17. Lekontsev Y.M., Leontyev A.V. Device for creating starter cracks in salt well walls. In: *Interexpo GEO-Siberia-2016: XII International Scientific Congress: International Scientific Conference "Subsoil Use. Mining. Directions and Technologies of*

Prospecting, Exploration and Development of Mineral Deposits. Geoecology". 2016; 3:181–184.

18. Skulkin A.A., Rubtsova E.V. On conducting measurement hydraulic fracturing in wells with natural fractures. *In: Interexpo GEO-Siberia-2023: XIX International Scientific Congress: International Scientific Conference "Subsoil Use. Mining. Directions and Technologies of Prospecting, Exploration and*

Development of Mineral Deposits. Geoecology". 2023; 1:236–242. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-2-1-236-242.

19. Dementyev A.D., Nazarov L.A., Nazarova L.A. *Applied Problems of Elasticity Theory*. Novosibirsk: NSAU Publ.; 2002. 224 p.

20. Timoshenko S.P., Goodier J.N. *Theory of Elasticity*. Moscow: Nauka; 1975. 576 p.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Alexander A. Skulkin, Junior Researcher, Chinakal Institute of Mining, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences, (630091, Russian Federation, Novosibirsk, Krasny prospect, 54), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7733-7482>, e-mail: chupptt@yandex.ru

Anton V. Panov, Junior Researcher, Chinakal Institute of Mining, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences, (630091, Russian Federation, Novosibirsk, Krasny prospect, 54), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8552-3692>, e-mail: anton-700@yandex.ru

Ekaterina V. Rubtsova, C. Sci. in Engineering, Associate Professor, Senior Researcher, Chinakal Institute of Mining, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences, (630091, Russian Federation, Novosibirsk, Krasny prospect, 54), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0958-9152>, e-mail: rubth@misd.ru

Nelly A. Miroshnichenko, C. of Physical and Mathematical Sci., Researcher, Chinakal Institute of Mining, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences, (630091, Russian Federation, Novosibirsk, Krasny prospect, 54), ORCID:

Contribution of the authors:

Alexander A. Skulkin – data collection and analysis, conclusions.

Anton V. Panov – literature review, writing the text.

Ekaterina V. Rubtsova – formulation of the research problem, writing the text.

Nelly A. Miroshnichenko – numerical experiments, graphical presentation of the results.

All authors have read and approved the final manuscript.

