



**КОНТРОЛЬ ОТКЛОНЕНИЙ СООСНОСТИ СКВАЖИН ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ
НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ МЕТОДОМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СКВАЖИН**

В. Д. Барышников, Д. В. Барышников, Д. А. Утев

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

Предложен способ контроля соосности скважин на различных глубинах при определении напряжений в массиве горных пород методом параллельных скважин. Он основан на анализе смещений контура измерительной скважины по различным направлениям деформометра в процессе ступенчатого нагружения контура возмущающей скважины. Способ позволяет также оценить угол возможного отклонения оси, соединяющей центры скважин, от горизонта или вертикали. Приведены результаты сравнительной оценки расчетных углов отклонений с фактически установленными по данным тахеометрической съемки координат центров скважин.

Метод параллельных скважин, напряжение, нагрузка, смещение, соосность скважин

**MISALIGNMENT CONTROL IN PARALLEL HOLE DRILLING
TECHNIQUE OF STRESS MEASUREMENT IN ROCK MASS**

V. D. Baryshnikov, D. V. Baryshnikov, and D. A. Utev

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Email: v-baryshnikov@yandex.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

A method is proposed to control misalignment of boreholes drilled in parallel to one another for the purpose of stress measurement in rock mass. The method includes the analysis of displacements of the measurement hole boundary along different orientations of a strain gauge during step-by-step loading of the disturbance hole boundary. This method allows determining the angle of possible horizontal or vertical offset of axis connecting the hole centers. The calculated offset angles are compared with the actual tacheometric survey data on the center coordinates of holes.

Parallel boreholes technique, stress, load, displacement, holes alignment

Важная составная часть геомеханических исследований — изучение напряженного состояния породного массива в условиях естественного залегания [1 – 3]. Использование для этих целей частных гипотез Гейма или Динника не всегда оправдано и неприемлемо в тектонически активных районах.

Одним из экспериментальных методов определения напряжений является разработанный в ИГД СО РАН метод параллельных скважин [4, 5]. Он заключается в анализе смещений контура измерительной скважины, вызванных возмущением исходного напряженного состояния, путем бурения соосной скважины большего диаметра [5]. Последующее ступенчатое нагружение контура возмущающей скважины с регистрацией соответствующих радиальных смещений контура измерительной скважины обеспечивают оценку деформационных свойств массива на участке эксперимента, необходимую при расчете напряжений (рис. 1).

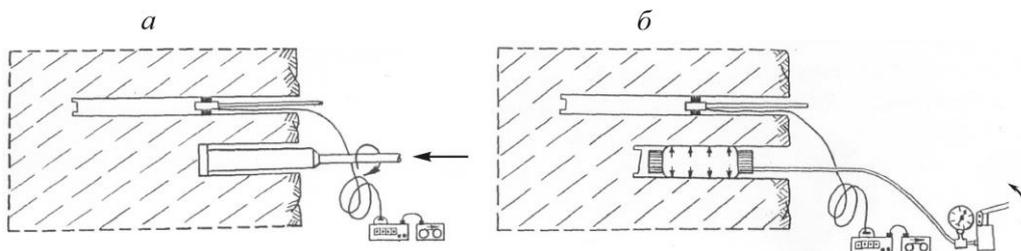


Рис. 1. Схема проведения эксперимента: *a* — бурение возмущающей скважины с регистрацией деформаций измерительной скважины; *б* — нагружение возмущающей скважины с регистрацией деформаций измерительной скважины

Расчетная схема метода основана на решении задачи теории упругости о напряженно-деформированном состоянии массива с двумя неодинаковыми отверстиями [4]. При определении компонент и квазиглавных напряжений в плоскости измерений смещений учитываются геометрические параметры эксперимента: радиусы измерительной r_0 и возмущающей R_0 скважин, расстояние между их центрами l_0 и ориентация измерительных направлений относительно оси X , соединяющей центры скважин (рис. 2).

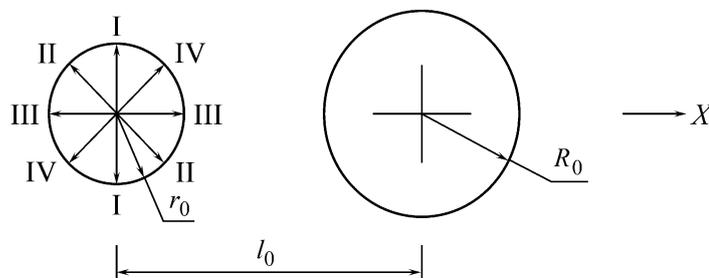


Рис. 2. Схема расположения измерительной и возмущающей скважин

Точность расчета величин напряжений зависит от достоверности задания геометрических параметров эксперимента. В процессе реализации метода возможны отклонения соосности и расстояния между центрами скважин по мере удаления от контура выработки.

Отклонения оси, соединяющей центры измерительной и возмущающей скважин, относительно горизонта (вертикали) можно определить на основе оценки ориентации осей эллипса, аппроксимированного по результатам радиальных смещений контура измерительной скважины, по четырем измерительным направлениям или восьми измерительным точкам деформометра при нагружении возмущающей скважины. Для этого используется векторный анализ, позволяющий установить направления векторов наибольшего растяжения или сжатия контура измерительной скважины.

При соосном расположении скважин направление вектора наибольшего растяжения $\vec{V}_{\text{раст}}$ совпадает с первым (I) измерительным направлением деформометра, а сжатие — с третьим (III). При этом оси X и Y совпадают с вертикальной осью B и горизонтальной осью Γ соответственно (рис. 3). Для оценки возможного угла смещения α осей X и Y (рис. 3б) используются данные радиальных смещений контура измерительной скважины. При этом возможны следующие варианты значений смещений по II и IV измерительным направлениям:

- смещения по второму направлению положительные (растяжение), а по четвертому — отрицательные (сжатие);
- смещения по четвертому направлению положительные, а по второму — отрицательные;
- по обоим направлениям смещения положительные;
- по обоим направлениям смещения отрицательные.

В первом случае большая ось эллипса (направление максимального растяжения) смещается в сторону второго измерительного направления деформометра (рис. 3), во втором — в сторону четвертого. Для определения направления отклонения оси в двух последних случаях сравниваются смещения по направлениям II и IV: при положительных значениях большая ось эллипса отклоняется от первого направления в сторону большего смещения, а при отрицательных — в сторону меньшего смещения (по модулю).

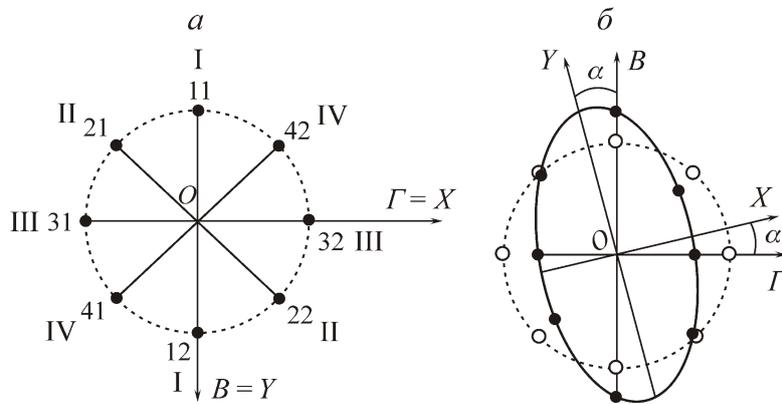


Рис. 3. Схема ориентации измерительных направлений деформометра (а) и угол отклонения оси эллипса (б)

Для оценки угла α проводится векторное сложение смещений первого измерительного направления и направления, в сторону которого происходит смещение главной оси аппроксимированного эллипса, по правилу параллелограмма (рис. 4), где \vec{V}_I — деформирование контура скважины по первому направлению; \vec{V}_B — деформирование контура по направлению, к которому смещается главная ось эллипса; β — угол, смежный с углом между векторами \vec{V}_I и \vec{V}_B .

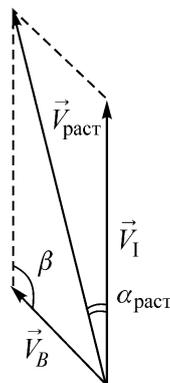


Рис. 4. Сложение векторов

В соответствии с правилом сложения векторов при положительном смещении по направлению \vec{V}_B (значение смещения по направлению \vec{V}_B совпадает по знаку со значением смещения по направлению \vec{V}_I) угол $\beta = 135^\circ$, при отрицательном — 45° (значения смещений по направлениям \vec{V}_B и \vec{V}_I имеют разные знаки). Угол $\alpha_{\text{раст}}$ между \vec{V}_I и $\vec{V}_{\text{раст}}$ является углом отклонения большой оси аппроксимированного эллипса от вертикали, поскольку направление \vec{V}_I совпадает с вертикальной осью. Модуль вектора $\vec{V}_{\text{раст}}$ вычисляется согласно теореме косинусов по формуле (1)

$$\vec{V}_{\text{раст}} = \sqrt{|\vec{V}_I|^2 + |\vec{V}_B|^2 - 2|\vec{V}_I||\vec{V}_B|\cos\beta}, \quad (1)$$

а угол $\alpha_{\text{раст}}$ — по формуле (2)

$$\alpha_{\text{раст}} = \arccos \left(\frac{|\vec{V}_{\text{раст}}|^2 + |\vec{V}_I|^2 - |\vec{V}_B|^2}{2|\vec{V}_{\text{раст}}||\vec{V}_I|} \right). \quad (2)$$

Теоретически угол поворота большой оси аппроксимированного эллипса $\alpha_{\text{раст}}$ совпадает с углом поворота малой оси $\alpha_{\text{сж}}$, но на практике эти углы отличаются. Различия объясняются значительным углом между измерительными направлениями деформометра, равным 45° , что позволяет только приблизительно оценить угол отклонения соосности скважин. Для его уточнения оценивается угол $\alpha_{\text{сж}}$ смещения малой оси аппроксимированного эллипса. Для этого по указанному алгоритму рассчитываются суммы векторов для направлений II и III, в случае отклонения осей эллипса от горизонтали — против часовой стрелки и для направлений III и IV — по часовой. Полный угол смещения осей эллипса относительно горизонта

$$\alpha = \frac{\alpha_{\text{раст}} + \alpha_{\text{сж}}}{2}. \quad (3)$$

Оценка угла смещения соосности также возможна с применением данных смещения измерительных точек деформометра, что повышает достоверность его определения. Основное отличие состоит в расчете векторной суммы симметрично для пар точек. Например, при смещении главной оси эллипса в сторону направления IV вычисляются векторные суммы между смещениями точек 32 и 42, 31 и 41, 11 и 21, 12 и 22. Угол α рассчитывается путем усреднения по четырем найденным углам.

Сравнительный анализ расчетных значений углов α по предложенному методу с фактически установленными углами $\alpha_{\text{экср}}$ по результатам тахеометрических съемок координат центров скважин выполнен исходя из экспериментальных исследований напряжений в соляной толще на руднике “Мир” АК “Алроса”. На рис. 5 приведены графики экспериментальных смещений при ступенчатом нагружении возмущающей скважины на различных глубинах измерения напряжений.

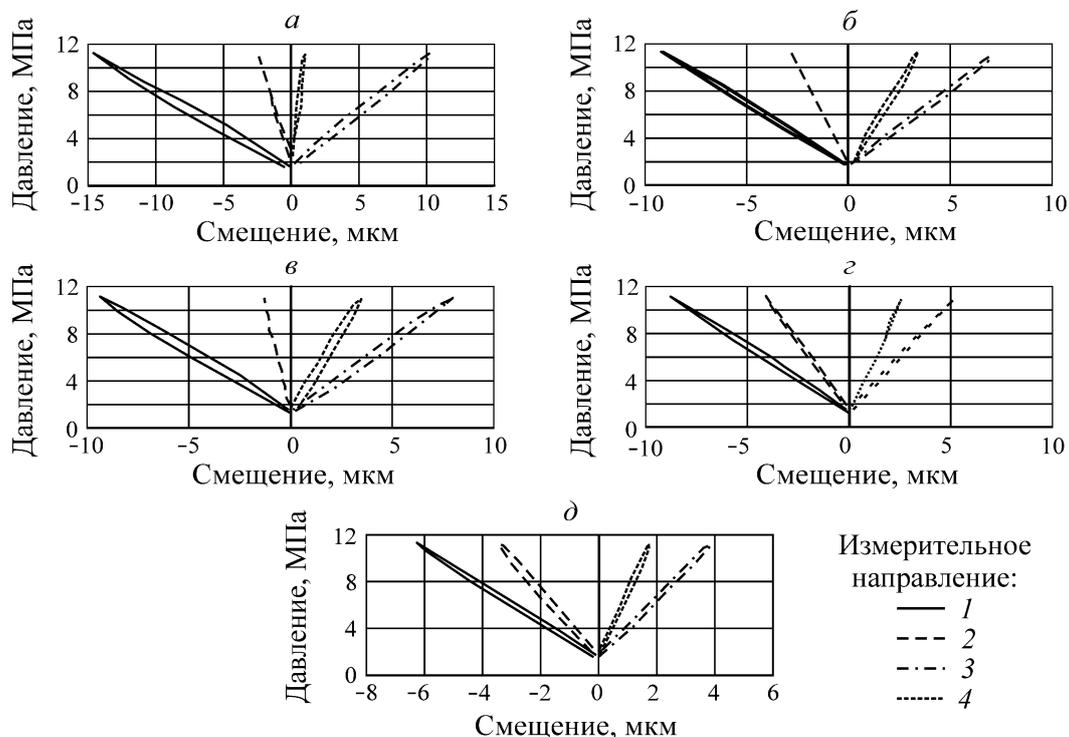


Рис. 5. Графики радиальных смещений контура скважины по измерительным направлениям деформометра при нагружении возмущающей скважины на различных глубинах, м: а — 0.36; б — 1.15; в — 2.59; г — 3.53; д — 5.26

В таблице представлены значения углов отклонения соосности скважин, полученные по результатам инструментального определения координат центров скважин на основе тахеометрической съемки и расчетным путем по предложенному способу, которые свидетельствуют о достаточной их сходимости. Различие в углах не превышает 1.5° , что вполне допустимо на практике.

Экспериментальные и расчетные значения угла отклонения скважин

| Глубина, м | $\alpha_{\text{эксп}}$ | | α | |
|---------------|------------------------|-----|----------|-----|
| | град. | мин | град. | мин |
| 0.4 | 5 | 15 | 4 | 2 |
| 1.1 | 5 | 33 | 4 | 31 |
| 1.8 | 7 | 49 | 8 | 23 |
| 2.5 | 9 | 34 | 10 | 57 |
| 4.6 | 15 | 32 | 15 | 34 |

В случае установления отклонений соосности скважин возможна корректировка межцентрового расстояния l_i при известном значении l_0 на контуре выработки: $l_i = l_0 / \cos \alpha$.

ВЫВОДЫ

Предложен способ контроля соосности скважин при определении напряжений методом параллельных скважин. Угол возможного отклонения оси, соединяющей центры скважин, от горизонтали или вертикали оценивается с помощью векторного анализа радиальных смещений контура измерительной скважины при ступенчатом нагружении возмущающей скважины. Сравнительный анализ расчетных значений углов отклонений с данными инструментальных наблюдений при оценке напряжений на руднике “Мир” АК “Алроса” свидетельствует о приемлемой для практических целей величине их расхождений, не превышающей 1.5° .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **General methodological provisions** of a comprehensive study of the problems of geomechanics, works of VNIMI, 1970, no. 81, 333 pp. [Общие методические положения комплексного исследования проблем геомеханики: труды ВНИМИ. — 1970. — № 81. — 333 с.]
2. **Vlokh N. P. and Sashurin A. F.** Stress Measurement in Strong Rock Mass, Moscow, Nedra, 1970. (in Russian) [Влох Н. П., Сашурин А. Ф. Измерение напряжений в массиве крепких горных пород. — М.: Недра, 1970. — 120 с.]
3. **Turchaninov I. A., Iosif M. A., and Kasparayn E. V.** Fundamentals of Rock Mechanics, Leningrad, Nedra, 1977, 503 pp. (in Russian) Турчанинов И. А., Иосиф М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. — Л.: Недра, 1977. — 503 с.]
4. **Kurlenya M. V. and Popov S. N.** Theoretical framework for the stress measurement in rock mass, Moscow, Nauka, 1983, 97 pp. (in Russian) [Курленя М.В. Попов С.Н. Теоретические основы определения напряжений в горных породах. — М.: Наука, 1983. — 97 с.]
5. **Pat.** 2699295 RF. Parallel hole drilling technique for the stress-strain behavior assessment in rock mass. V. D. Baryshnikov, D. V. Baryshnikov, and A. P. Khmelinin, Byull. Izobret., 2019, no. 25 [Пат. 2699295 РФ. Способ определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород методом параллельных скважин / В. Д. Барышников, Д. В. Барышников, А. П. Хмелинин // Оpubл. в БИ. — 2019. — № 25.]