



О ВЫЧИСЛЕНИИ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТОДЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СКВАЖИН

В. И. Машуков

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

Представлены результаты модификации программного обеспечения метода параллельных скважин, направленные на повышение точности вычисления напряжений и оснащение программ современным интерфейсом. Для решения граничных задач применен алгоритм линейных комбинаций. Проведена обработка экспериментальных данных, полученных с помощью деформометра.

Метод параллельных скважин, вычисление напряжений, обработка результатов натурных измерений, измерения вне зоны влияния выработок, измерения в зоне влияния выработок

CALCULATION OF STRESSES IN PARALLEL BOREHOLE METHOD

V. I. Mashukov

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: mvimash@gmail.com, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The results of upgrading the software for parallel borehole method aimed at improving stress calculation accuracy and equipping software with a present-day interface are presented. To solve boundary value problems, an algorithm of linear combinations is applied. Experimental data obtained using borehole deformation gauge are processed.

Parallel borehole method, calculation of stresses, processing of field measurement results, measurements outside the influence zone of mine workings, measurements in the influence zone of mine workings

Метод параллельных скважин разработан более сорока лет назад и успешно применяется для определения напряжений в нетронутом массиве по настоящее время [1 – 3]. Большое значение для интерпретации полученных натурных данных имеет корректное математическое описание напряженно-деформированного состояния массива в районе проведения экспериментов. Для решения возникающих граничных задач механики горных пород целесообразно применить алгоритм линейных комбинаций в варианте линейной комбинации сингулярных решений и на его основе провести модификацию программного обеспечения метода параллельных скважин, направленную на повышение точности вычисления напряжений и оснащение программ современным интерфейсом.

Деформометр вне зоны влияния выработок. Для определения напряжений в случае протяженной выработки достаточно решить плоские задачи для двух сечений: одно для выработки, другое для параллельных скважин, если выработка не протяженная, то необходимо решать трехмерную задачу. Деформометр должен быть расположен за пределами зоны разрыхления породы. Если в окрестности выработки наблюдаются процессы разрыхления пород, то r_0 на рис. 1 это радиус зоны разрыхления.

Координатная ось Oy направлена вверх, координатная ось Oz — параллельна оси выработки. Координатная ось Ox направлена так, что ее поворот к оси Oy происходит против часовой стрелки, если смотреть на плоскость Oxy от положительных значений координаты z . Таким образом, для выработки плоские задачи решаются в плоскости Oxy , для скважин в плоскости Oxz , если скважины бурятся вверх или вниз, и в плоскости Oyz , если скважины бурятся в борта выработки.

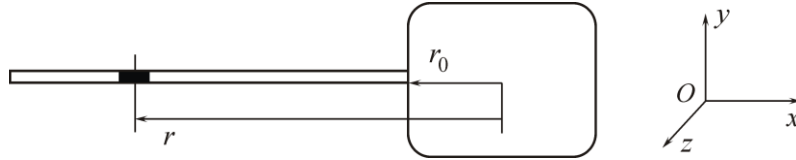


Рис. 1. Выработка и измерительная скважина: r_0 — радиус зоны разрыхления пород вокруг выработки; r — расстояние от центра выработки до деформометра

При измерении напряжений методом параллельных скважин необходимо оценить влияние выработки, из которой бурятся измерительные скважины, на напряженное состояние нетронутого массива для того, чтобы внести поправки в результаты расчетов. Далее рассматривается одиночная выработка, длина которой в обе стороны более чем в два раза превосходит длину измерительных скважин.

Решения граничных задач представляются в виде линейных комбинаций решений для сосредоточенных усилий, приложенных в точках, отстоящих от центров граничных элементов на расстоянии, равное длине этих элементов, в направлении внешней нормали по отношению области деформирования. Граничные задачи решаются с помощью алгоритма линейных комбинаций [4]. Теоретические предпосылки для разработки алгоритма линейных комбинаций изложены в [5–8].

Вектор смещения $v(x_1, x_2)$ в области D_i для сосредоточенного усилия имеет вид [9]:

$$V(x_1, x_2) = \begin{pmatrix} c \ln r - d \left(\frac{\partial r}{\partial x_1} \right)^2 & -d \frac{\partial r}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial r}{\partial x_2} \\ -d \frac{\partial r}{\partial x_1} \frac{\partial r}{\partial x_2} & c \ln r - d \left(\frac{\partial r}{\partial x_2} \right)^2 \end{pmatrix},$$

$$v(x_1, x_2) = V(x_1, x_2) t_{ij}, \quad (1)$$

$$c = \frac{\lambda + 2\mu}{2\mu(\lambda + 2\mu)}, \quad d = \frac{\lambda + \mu}{2\mu(\lambda + 2\mu)}.$$

где λ, μ — константы Ламе; n_{ij} — внешний вектор нормали к граничному контуру области D_i в центре граничного элемента с номером j ; s_{ij} — касательный вектор к граничному контуру области D_i в центре граничного элемента с номером j ; $r = [(z_1 - y_1)^2 + (z_2 - r_2)^2]^{0.5}$, $z_{ij} = (z_1, z_2)$ — центр граничного элемента; $p_{ij} = (y_1, y_2)$ — точка приложения сосредоточенного усилия t_{ij} .

Вектор усилий T_{ij} в точке z_{ij} для сосредоточенного усилия t_{ij} [9]:

$$M_{ij} = \begin{pmatrix} a \frac{\partial}{\partial n_{ij}} \ln r + 2b \left(\frac{\partial r}{\partial z_1} \right)^2 \frac{\partial}{\partial n_{ij}} \ln r & -a \frac{\partial}{\partial s_{ij}} \ln r + 2b \frac{\partial r}{\partial z_1} \frac{\partial r}{\partial z_2} \frac{\partial}{\partial n_{ij}} \ln r \\ a \frac{\partial}{\partial s_{ij}} \ln r + 2b \frac{\partial r}{\partial z_1} \frac{\partial r}{\partial z_2} \frac{\partial}{\partial n_{ij}} \ln r & a \frac{\partial}{\partial n_{ij}} \ln r + 2b \left(\frac{\partial r}{\partial z_2} \right)^2 \frac{\partial}{\partial n_{ij}} \ln r \end{pmatrix},$$

$$T_{ij} = M_{ij} t_{ij}, \quad (2)$$

$$a = \frac{\mu}{\lambda + 2\mu}, \quad b = \frac{\lambda + \mu}{\lambda + 2\mu}.$$

В качестве примера на рис. 2 представлены распределения напряжений в окрестности выработки, контур которой свободен от нагрузок, а на бесконечности задано $\sigma_{x\infty} = 1$.

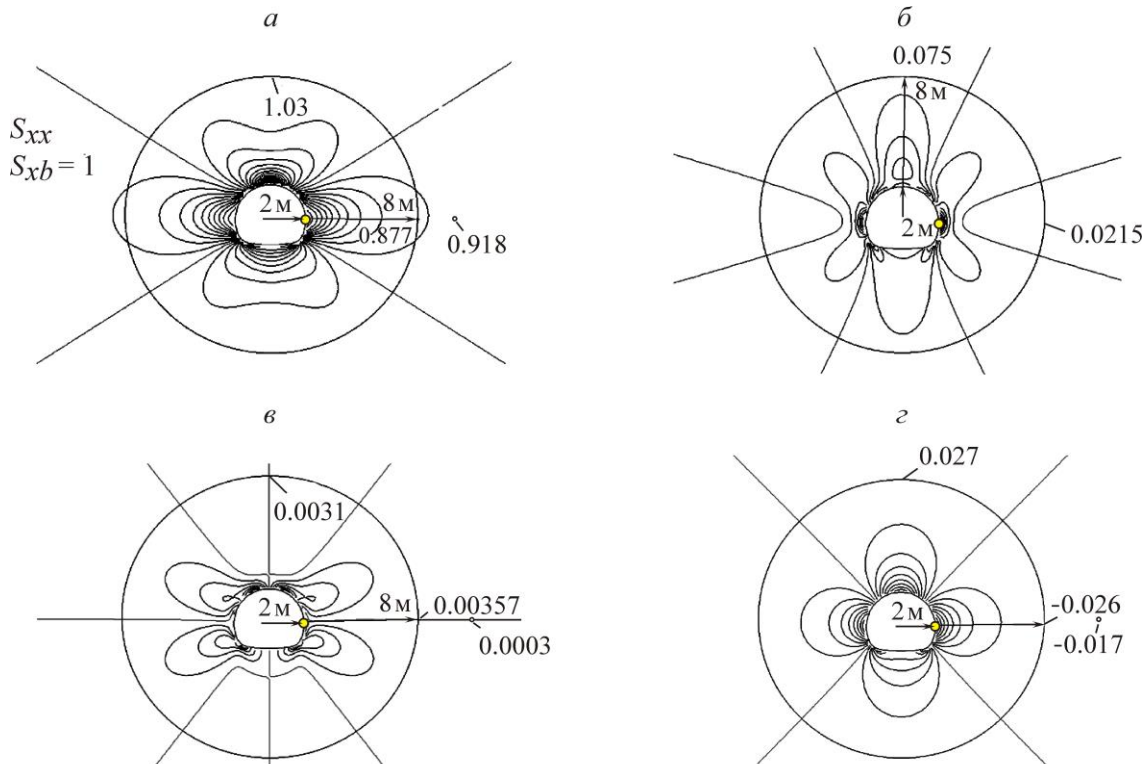


Рис. 2. Напряжения σ_x (а), σ_y (б), τ_{xy} (в), σ_z (г)

На расстоянии четырех и более радиусов от центра выработки (трех радиусов от поверхности выработки) по вертикали возмущение не превосходит 3 % от напряжения на бесконечности и в нетронутом массиве. По горизонтали возмущение не превосходит 12.3 %, по σ_y — 7.5 и 2.15 %, по τ_{xy} — 0.0031 и 0.0036 %, по σ_z — 2.7 и 2.6 % соответственно. Наибольшие искажения в измерениях будут вноситься выработкой в напряжение σ_x при горизонтальном бурении и в напряжение σ_y — при вертикальном.

Напряжения и смещения в окрестности одиночной скважины. Если измерительные скважины бурятся в потолочину или дно выработки, то в поперечном сечении скважин координатными осями будут Ox и Oz . Ось Oy будет направлена вверх и вниз соответственно. Если измерительные скважины бурятся в борта выработки, то в поперечном сечении координатными осями будут Oy и Oz . Ось Ox будет направлена вглубь массива перпендикулярно осям Oy и Oz .

Как отмечено ранее, наибольшее возмущение в исходное напряженное состояние выработка вносит в трех случаях. В этих случаях необходимо принимать меры для исключения влияния выработки на результаты измерений: бурить скважины достаточно глубоко, чтобы исключить влияние выработки, или вносить в результаты расчетов поправки, учитывающие влияние выработки на результаты измерений, в частности, бурить скважины длиной не менее четырех радиусов выработки. В более близкой зоне из-за больших градиентов возмущающих напряжений от выработки разброс в результатах измерений может оказаться неприемлемым.

Напряженное состояние в окрестности измерительной скважины в точке расположения деформометра представляется тензором

$$\begin{pmatrix} \sigma_{x0} & \tau_{xy0} & \tau_{xz0} \\ \tau_{xy0} & \sigma_{y0} & \tau_{yz0} \\ \tau_{xz0} & \tau_{yz0} & \sigma_{z0} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Если скважины пробурены в борт выработки, то деформометр позволяет измерить смещения в плоскости Ozy . Вообще говоря, возможно при соответствующей конструкции измерительного прибора измерять смещения точек на стенках скважины относительно друг друга в результате антиплоской деформации (вдоль оси скважины) и таким образом в одном эксперименте определять полный тензор исходных напряжений. Антиплоская деформация в рассматриваемом случае вызывается напряжениями τ_{xy0} и τ_{xz0} .

Изменения напряжения по третьему направлению σ_{x0} влияют на среднее давление в точке расположения деформометра и, как следствие, вызывают уменьшение или увеличение диаметра скважины

$$\sigma_{xy0} = \nu(\sigma_z + \sigma_y). \quad (4)$$

Далее предполагается, что компоненты тензора (3) постоянны, измерительная скважина имеет бесконечную длину в обе стороны, антиплоская деформация не влияет на результаты измерений.

На рис. 3 приведены проекции смещений на нормаль для одиночной скважины диаметром 0.1 м при заданных на бесконечности единичных напряжениях $\sigma_{z\infty}$, $\sigma_{y\infty}$, $\tau_{zy\infty}$, $\lambda = 0.4 \cdot 10^4$ МПа, $\mu = 0.3 \cdot 10^4$ МПа ($E = 0.7714 \cdot 10^4$ МПа, $\nu = 0.2857$).

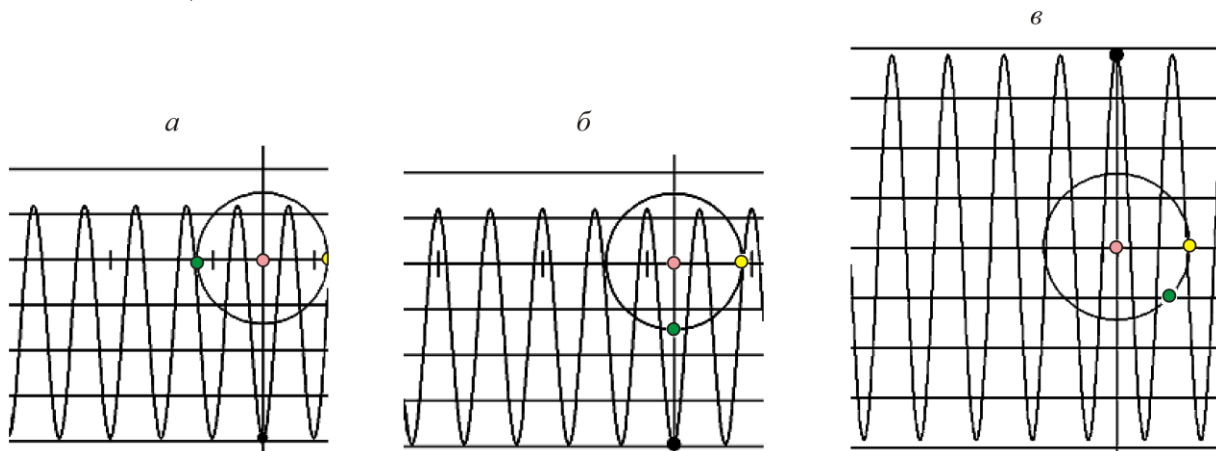


Рис. 3. Проекция вектора смещений на нормаль (одиночная скважина): *a* — при $\sigma_{z\infty} = 1$ (максимальное по модулю значение $0.1185 \cdot 10^{-4}$); *b* — при $\sigma_{y\infty} = 1$ (максимальное по модулю значение $0.1185 \cdot 10^{-4}$); *v* — при $\tau_{zy\infty} = 1$ (максимальное по модулю значение $0.154 \cdot 10^{-4}$)

Напряжения и смещения в окрестности двух скважин. На рис. 4 точке, отмеченной на граничном контуре темным кружком, на графике проекции вектора смещений соответствует точка, отмеченная темным кружком.

Смещения на поверхности измерительной скважины при наличии возмущающей скважины за вычетом смещений на поверхности одиночной скважины измерительной скважины это измеряемые смещения. При достаточном количестве датчиков напряжения в массиве определяются одним измерением по форме и амплитуде измеренных смещений. При недостаточном количестве датчиков потребуются несколько измерений.

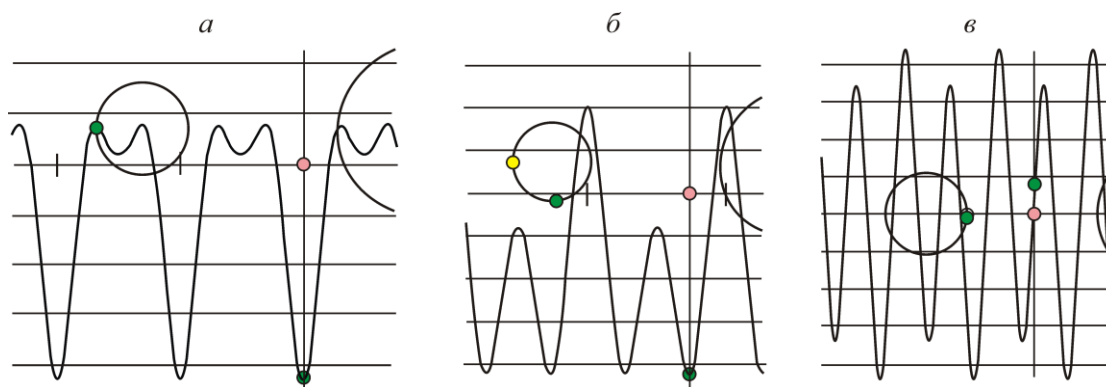


Рис. 4. Проекция вектора смещений на нормаль (две скважины): *a* — при $\sigma_{z\infty} = 1$ (максимальное по модулю значение $0.171 \cdot 10^{-4}$); *b* — при $\sigma_{y\infty} = 1$ (максимальное по модулю значение $0.127 \cdot 10^{-4}$); *v* — $\tau_{zy\infty} = 1$ (максимальное по модулю значение $0.223 \cdot 10^{-4}$)

Этапы измерений и обработки результатов измерений Измерение напряжений в массиве состоит из следующих этапов:

- решение граничной задачи для одиночной выработки или группы выработок с целью установления направления бурения скважин и точки расположения деформометра;
- определение смещений поверхности измерительной скважины, вызванных бурением возмущающей скважины;
- решение граничных задач для одиночной скважины с единичными напряжениями на бесконечности для вычисления наведенного вектора усилий на планируемом контуре возмущающей скважины, соответствующего решению дополнительной задачи для измерительной скважины;
- для каждого единичного напряжения на бесконечности решение граничной задачи для двух скважин с нулевым вектором усилий на контуре измерительной скважины и с суммой значений на контуре возмущающей скважины вектора усилий, противоположного наведенному, и вектора усилий дополнительной задачи;
- решение оптимизационной задачи подбора коэффициентов линейной комбинации смещений из решений граничных задач предыдущего пункта на контуре измерительной скважины с целью минимизации отличий измеренных и вычисленных смещений;
- коэффициенты линейной комбинации являются искомыми напряжениями в нетронутом массиве.

Если встретились горные породы с другими деформационными свойствами, решать граничные задачи для одиночной скважины необходимо заново, иначе могут быть использованы предыдущие расчеты. То же самое относится к задаче с выработкой. В задачах с двумя скважинами предыдущими решениями можно воспользоваться, если совпадут деформационные свойства породы, диаметры скважин и расстояния между скважинами.

ВЫВОДЫ

Методы расчетов и вычислительные алгоритмы, представленные в статье, созданы на основе современных достижений теории граничных интегральных уравнений, что позволило достичь нескольких целей:

- разработать программное обеспечение для расчетов напряженно-деформированного состояния в окрестности системы очистных и подготовительных выработок, обеспечивающее планирование натуральных экспериментов;
- повысить точность расчетов при обработке натуральных экспериментальных измерений и качество натуральных экспериментов в целом;

- расширить область применения метода параллельных скважин, обеспечив обработку экспериментальных данных при толщине перемычки между скважинами до 0.1 диаметра измерительной скважины;

- сделать современную систему ввода-вывода для программы обработки экспериментальных данных путем применения графических средств современных персональных компьютеров, что дало возможность снизить трудоемкость и повысить оперативность обработки результатов в полевых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Kurlenya M. V. and Popov S. N.** Theoretical Foundations of Determination of Stresses in Rocks, Novosibirsk, Nauka, 1983, 99 pp. [**Курленя М. В., Попов С. Н.** Теоретические основы определения напряжений в горных породах. — Новосибирск: Наука, 1983.— 99 с.]
2. **Pat.** 2699295 RF. Downhole multichannel deformometer and an automated system for recording and processing data for determining the stress-strain state of a rock mass with its use, V. D. Baryshnikov, V. G. Kachalskiy, D. V. Baryshnikov, *Byull. Izobret.*, 2017, no. 16. [**Пат.** 2699295 РФ. Скважинный многоканальный деформометр и автоматизированная система регистрации и обработки данных для определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород с его использованием / В. Д. Барышников, В. Г. Качальский, Д. В. Барышников // Оpubл. в БИ. — 2017. — № 16.]
3. **Pat.** 2699295 RF. Method for determining the stress-strain state of a rock mass by the method of parallel wells, V. D. Baryshnikov, D. V. Baryshnikov, 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.]
4. **Mashukov V. I.** The outer layer method for solving boundary value problems in elasticity theory, *Siberian Journal on Numerical Mathematics*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 289–296. [**Машуков В. И.** Метод внешнего слоя для решения краевых задач теории упругости // Сиб. журн. вычисл. математики. — 2017. — Т. 20. — № 3. — С. 289–296.]
5. **Aleksidze M. A.** Solution of boundary value problems by the method of expansion in non-orthogonal functions, Moscow, Nauka, 1978, 352 pp. [**Алексидзе М. А.** Решение граничных задач методом разложения по неортогональным функциям. — М.: Наука, 1978. — 352 с.]
6. **Kostyuchenko S. B.** Method of non-orthogonal series for imperfectly conjugate elliptic problems with discontinuous coefficients, *Journal Computational technologies*, Novosibirsk, 2000, vol. 5, no. 1, pp. 52–64. [**Костюченко С. В.** Метод неортогональных рядов для неидеально сопряженных эллиптических задач с разрывными коэффициентами // Журн. Вычислительные технологии. — Новосибирск. — 2000, — Т. 5. — № 1. — С. 52–64.]
7. **Yasnitskiy L. N.** The method of fictitious canonical domains in continuum mechanics, Moscow, Nauka, 1992, 128 pp. [**Ясницкий Л. Н.** Метод фиктивных канонических областей в механике сплошных сред. — М.: Наука, 1992. — 128 с.]
8. **Kobylyansky Yu. V., Popkova T. L., and Slepyan G. Ya.** On the method of non-orthogonal series for the numerical solution of problems in mathematical physics, *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1988, vol. 28, no. 2, pp. 237–246. [**Кобылянский Ю. В., Попкова Т. Л., Слепян Г. Я.** О методе неортогональных рядов для численного решения задач математической физики. // ЖВМ и МФ. — 1988. — Т. 28. — № 2. — С. 237–246.]
9. **Kupradze V. D.** Potential Methods in the Theory of Elasticity, Moscow, Fizmatgiz, 1963, 472 pp. [**Купрадзе В. Д.** Методы потенциала в теории упругости. — М.: Физматгиз, 1963. — 472 с.]