



**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИБОРНОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ
МЕТОДОМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СКВАЖИН**

В. Д. Барышников¹, В. Г. Качальский^{1,2}, Д. В. Барышников¹

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: v-baryshnikov@yandex.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

²*Новосибирский государственный технический университет, E-mail: kwg@ngs.ru,
просп. К. Маркса 20, г. Новосибирск 630073, Россия*

Рассмотрены задачи разработки технических и программных средств при проведении натуральных исследований напряженно-деформированного состояния в породном массиве, для решения которых использован метод компенсации температурного дрейфа и экспоненциального сглаживания сигналов от тензодатчиков. Показано, что модули программного обеспечения позволяют в режиме реального времени наблюдать процесс радиальных смещений контура измерительной скважины при бурении и нагружении параллельной возмущающей скважины, а также сохранять в файлах исходные данные для их камеральной обработки и архивирования.

Породный массив, температурный дрейф, метод параллельных скважин, тензодатчик, деформация, напряженное состояние

**SOFTWARE DEVELOPMENT FOR THE INSTRUMENT SYSTEM
TO DETERMINE STRESSES IN ROCK MASS BY PARALLEL BOREHOLE METHOD**

V. D. Baryshnikov¹, V. G. Kachalsky^{1,2}, and D. V. Baryshnikov¹

¹*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: v-baryshnikov@yandex.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

²*Novosibirsk State Technical University, E-mail: kwg@ngs.ru,
pr. K. Marksa 20, Novosibirsk 630073, Russia*

The problems of developing hardware and software for conducting full-scale investigations of stress-strain state in the rock mass are considered. To solve these problems, the method of temperature drift compensation and exponential smoothing of signals from strain gauges is used. It is shown that software modules allow real-time monitoring of radial displacements of the measuring well contour during drilling and loading of a parallel active well and saving the source data for their office processing and archiving in files.

Rock mass, temperature drift, parallel borehole method, strain gauge, strain, stress state

В соответствии с классификацией способов определения напряжений в горных породах [1] метод параллельных скважин относится к классу деформационных и является разновидностью методов возмущения поля напряжений в окрестности измерительной скважины [2, 3]. В отличие от метода щелевой [4] или частичной разгрузки скважиной на стенках выработки [5] он позволяет определять напряженно-деформированное состояние массива на удалениях до 6–8 м от ее контура. Уступая по информативности методу полной разгрузки керна с центральной скважиной [6], метод параллельных скважин позволяет находить три компоненты тензора

напряжений (квазиглавные в плоскости измерения), но отличается сравнительной простотой техникой выполнения опыта за счет разделения процессов бурения и измерений по разным скважинам, высокой производительностью и надежностью практической реализации.

Исследование напряженно-деформированного состояния массива горных пород и промышленных сооружений методом параллельных скважин предусматривает наличие достаточно сложных технических средств измерений и специального программного обеспечения [7]. Технические средства основаны на применении чувствительных к малым деформациям датчиках. Необходимость определения деформации в нескольких радиальных направлениях в скважинах диаметром 76 мм требует разработки измерительной части малого размера. В большинстве подобных приборов используются тензодатчики, наклеенные минимум на четыре измерительные балочки. Их главный недостаток — зависимость сигнала от температуры. Кроме того, тензосигнал, обычно не превышающий 2.2 мВ/В, не может быть передан в аналоговом виде на значительное расстояние без потерь и воздействий на него помех. Для повышения точности определения деформационных свойств и напряжений в массиве горных пород методом параллельных скважин за счет уменьшения погрешности измерения контура измерительной скважины проведена модернизация программно-технических средств на базе скважинного деформометра диаметром 76 мм [8]. С этой целью на каждую сторону измерительной балочки наклеены тензодатчики по полумостовой схеме, электронная часть которой размещена внутри скважинного многоканального деформометра. Такое решение полностью реализует мостовую сбалансированную схему измерительной части и практически минимизирует работу тензодатчиков в диапазоне температур 10–30 °С. Блок-схема приборного комплекса с каналами измерения радиальных смещений контура скважины и информационного обеспечения эксперимента по определению напряжений в массиве горных пород приведена на рис. 1.

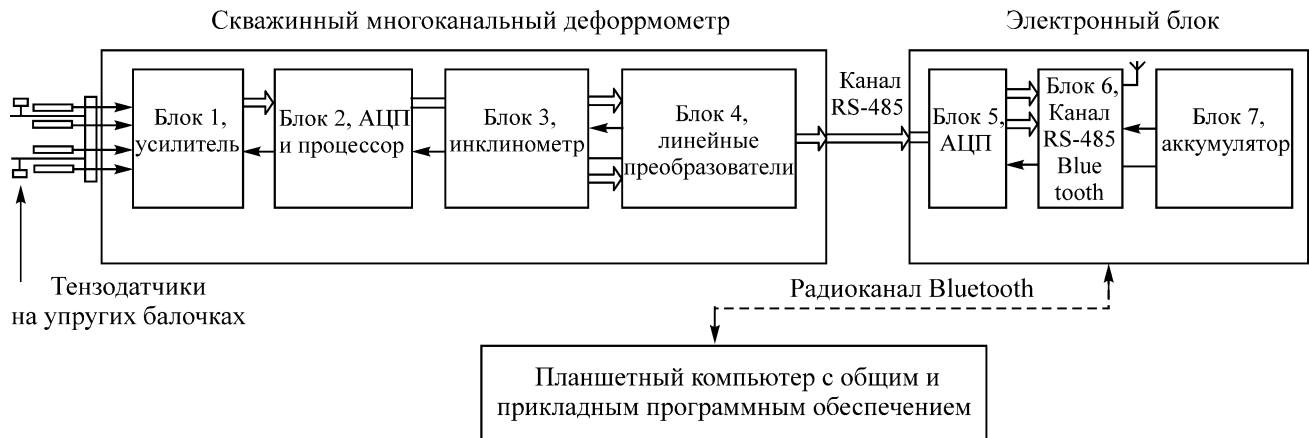


Рис. 1. Блок-схема приборного комплекса для определения напряжений в массиве горных пород

Для повышения точности ориентации деформометра в скважине в его корпусе установлен высокоточный инклинометр, контролирующий положение первой пары измерительных балочек относительно вертикальной оси скважины.

Программное обеспечение приборного комплекса состоит из двух частей (рис. 1): программного модуля, загружаемого в Flash-память и обеспечивающего работу микропроцессора скважинного многоканального деформометра, а также прикладного программного обеспечения, установленного в планшетный компьютер. Программа микропроцессора циклически запускает АЦП для опроса аналоговых сигналов от мостовых схем тензодатчиков и сигнала инклинометра. Полученные данные последовательно усредняются за 4 или 8 циклов опроса, а затем фильтруются методом экспоненциального сглаживания:

$$\begin{aligned}
X_{1j} &= a_1 x_{1j} - (1 - a_1) x_{1(j-1)}, \\
X_{2j} &= a_2 x_{2j} - (1 - a_2) x_{2(j-1)}, \\
X_{3j} &= a_3 x_{3j} - (1 - a_3) x_{3(j-1)}, \\
X_{4j} &= a_4 x_{4j} - (1 - a_4) x_{4(j-1)},
\end{aligned} \tag{1}$$

где X_{ij} — сглаженные значения сигнала в момент j от i -й пары балочек; x_{ij} — отсчет цифрового сигнала с АЦП i -й пары балочек в момент j ; $x_{i(j-1)}$ — отсчет цифрового сигнала с АЦП i -й пары балочек в момент $j - 1$; a_i — коэффициенты экспоненциального сглаживания, найденные экспериментально, выбираются из диапазона 0.5 – 0.95.

Система (1) представляет собой разностные уравнения первого порядка с зависимыми коэффициентами. Использование таких уравнений обусловлено тем, что коэффициент передачи фильтров равен 1 и не зависит от величины a_i .

Вычисленные значения X_{ij} и сигнал от инклинометра передаются в электронный блок. К ним добавляется значение напряжения аккумулятора. Полученная информация двумя пакетами циклически передается по радиоканалу Bluetooth в планшетный компьютер, где исходные данные обрабатываются прикладным программным обеспечением с помощью статистических методов коррекции временного дрейфа значений деформаций измерительных балочек, возникающих из-за продолжительного проведения натурных исследований при бурении и нагружении параллельной возмущающей скважины. По результатам применения к исходным данным корректирующих уравнений, полученных в [4], осуществляется коррекция исходных значений деформаций:

$$\begin{aligned}
Y_{1j} &= X_{1i} - (0.277t_j + 15.78), \\
Y_{2j} &= X_{2i} - (0.206t_j + 7.178), \\
Y_{3j} &= X_{3i} - (0.212t_j - 2.34), \\
Y_{4j} &= X_{4i} - (0.242t_j - 0.25),
\end{aligned} \tag{2}$$

где Y_{ij} — откорректированные значения смещений в момент t_j ; X_{ij} — сглаженные значения смещений от i -й пары балочек, полученные в результате эксперимента в момент t_j процессом (1); t_j — дискретное значение момента фиксации результата измерения.

Коэффициенты наклона линейных корректирующих уравнений {0.277, 0.20, 0.21, 0.242}, определенные методом наименьших квадратов, близки по своим абсолютным значениям, что свидетельствует об одинаковом влиянии температурного дрейфа на все четыре канала измерения деформаций. На рис. 2 показаны радиальные смещения контура измерительной скважины при бурении параллельной возмущающей скважины после коррекции исходных данных с учетом систем уравнений (1) и (2).

Кроме того, программные модули прикладного математического обеспечения позволяют выбрать нужный режим проведения экспериментов из следующего списка, который расширяется подпунктами:

1. Исходные данные (ввод характеристик объекта исследования, параметров технического и программного обеспечения).
2. Калибровка (программы калибровки деформометра, датчика давления в нагруженном устройстве, показаний индикатора напряжения аккумулятора).

3. Параллельные скважины (программа обеспечения этапов эксперимента и отображения полученных данных для определения деформационных свойств и действующих напряжений в исследуемом породном массиве).

4. Анализ архива (позволяет просмотреть архивные или только что полученные данные и содержит математическое обеспечение для вычисления напряжений).

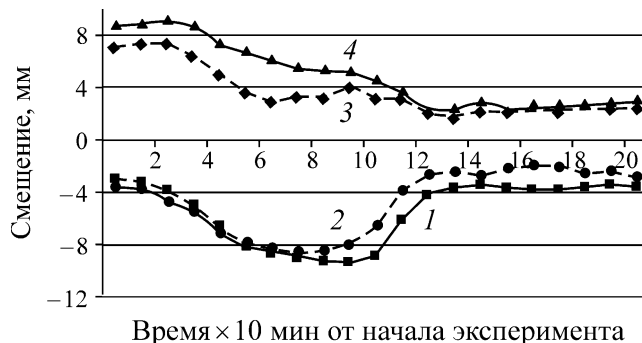


Рис. 2. Смещения контура скважины после линейной коррекции

Режим 2 обеспечивает вывод графиков изменения сигналов от мостовых схем балочек деформометра, сигналов от датчика давления и значения напряжения аккумулятора в процессе калибровки. Режим 3 позволяет отобразить процесс радиальных смещений контура измерительной скважины в процессе бурения параллельной возмущающей скважины или ее нагружения – разгрузки при определении деформационных свойств породного массива.

ВЫВОДЫ

Предложенный способ программной компенсации температурного дрейфа и экспоненциального сглаживания сигналов измерительной системы при проведении экспериментов методом параллельных скважин обеспечивает повышение точности натурного определения деформационных свойств и действующих напряжений в массиве. Принятые технические и программные решения при модернизации скважинного деформометра позволили получить достаточно устойчивые результаты определения радиальных смещений контура измерительной скважины.

Программное обеспечение для записи данных эксперимента дает возможность отображать и контролировать радиальные смещения контура измерительной скважины при бурении и нагружении возмущающей скважины в режиме реального времени. При этом обработка данных и их оперативная оценка осуществляются непосредственно на месте проведения эксперимента, что позволяет принять решение о целесообразности продолжения исследований на выбранном участке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Turchinov I. A., Markov G. A., Ivanov V. I., and Kozyrev A. A.** Tectonic Stresses in the Earth's Crust and Stability of Underground Openings. Leningrad: Nauka, 1978, 256 pp. (in Russian) [**Турчанинов И. А., Марков Г. А., Иванов В. И., Козырев А. А.** Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. — Л.: Наука, 1978. — 256 с.]
2. **Kurlenya M. V., Aksenov V. K., Leontiev A. V., and Ustyugov M. B.** Technique of Experimental Determination of Stresses in Rocks, Novosibirsk, Science, 1983, 105 pp. (in Russian) [**Курленя М. В., Аксенов В. К., Леонтьев А. В., Устюгов М. Б.** Техника экспериментального определения напряжений в осадочных породах. — Новосибирск: Наука, 1975. — 105 с.]
3. **Kurlenya M. V. and Popov S. N.** Theoretical Framework for Stress Determination in Rocks, Novosibirsk, Nauka, 1983, 97 pp. (in Russian) [**Курленя М. В., Попов С. Н.** Теоретические основы определений напряжений в горных породах. — Новосибирск: Наука, 1983. — 97 с.]

4. **Zubkov A. V.** Geomechanics and Geotechnology, Yekaterinburg, UrO RAN, 2001, 335 pp. (in Russian) [Зубков А. В. Геомеханика и геотехнология. — Екатеринбург: УрО РАН, 2001. — 335 с.]
5. **Ardashev K. A., Akhmatov V. I., and Katkov G. A.** Methods and Instruments for Investigation of Rock Pressure Manifestations, Moscow, Nedra, 1981, 128 pp. (in Russian) [Ардашев К. А., Ахматов В. И., Катков Г. А. Методы и приборы для исследований проявления горного давления. — М.: Недра, 1981. — 128 с.]
6. **Leeman E.** The “Doorstopper” and triaxial rock stress measuring instruments developed by the CIR, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 1969, vol. 69, no. 7, pp. 305–339.
7. **Baryshnikov V. D., Baryshnikov D. V., Gakhova L. N., and Kachalsky V. G.** Practical experience of geomechanical monitoring in underground mineral mining, Journal of Mining Science, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 855–864 (in Russian) [Барышников В. Д., Барышников Д. В., Гахова Л. Н., Качальский В. Г. Опыт применения геомеханического мониторинга при подземной разработке месторождений полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 61–73.]
8. **Pat.** 2655512 RF. Downhole multichannel deformometer and automated data recording and processing system for stress state determination in rock mass with application, V. D. Baryshnikov, V. G. Kachalsky, and D. V. Baryshnikov, Вуull. Izobret., 2018, no. 16 [Пат. 2655512 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 // Опубл. в БИ. — 2018. — № 16.]