

**А.В. Панов, А.А. Скулкин, Л.В. Цибизов,
Р.И. Родин**

ОЦЕНКА ПРИРОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА*

Предложен метод количественной оценки компонент природного поля напряжения в нетронутом массиве на основе натуральных данных о давлении записания в серии трещин гидроразрыва, проведенных в трех скважинах из выработки, удаленной от места ведения горных работ, и обосновывается состоятельность полученных результатов при помощи численного моделирования методом конечных элементов, а также результатами лабораторных экспериментов. Особенность исследования заключается в разработке методики определения компонент внешнего поля напряжений в плоскости, перпендикулярной направлению простирания выработки путем проведения испытаний на гидроразрыв и решения обратной задачи по данным записей давления в скважинах во времени и минимизации негативного влияния различного рода погрешностей и неопределенностей, связанных массивом горных пород и измерительной аппаратурой.

Ключевые слова: обратная задача, гидроразрыв, измерение напряжений, горная выработка, моделирование, метод конечных элементов, лабораторные испытания.

Введение

При проектировании подземных горных работ напряженно-деформированное состояние породного массива является вопросом первостепенной важности для обеспечения безопасности и прогноза устойчивости горных выработок. Существует ряд методов, позволяющих провести натурные измерения геомеханических параметров горного массива. При этом во многих случаях остается открытым вопрос о достоверности полученных значений напряжений вследствие некорректности

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14–05–31482 мол_а).

постановки и неединственности решения обратной задачи, в которой тот или иной метод находит теоретическое обоснование [1]. Среди наиболее распространенных можно выделить методы основанные на измерении смещения или деформации горных пород, методы компенсационной нагрузки [2, 3], а также геофизические методы, показывающие хорошие результаты при состоянии массива близком к разрушению [1, 3]. Большинство этих методов являются весьма трудоемкими и дорогостоящими. Поэтому одной из исследовательских задач является снижение трудоемкости разрабатываемой методики за счет использования существующих выработок и скважин.

Прямая задача: постановка, метод решения

Рассмотрим отдельно стоящую протяженную горную выработку (рис. 1) в однородном ненарушенном массиве, находящуюся на значительном удалении от места ведения горных работ. В этом случае, природное поле напряжений практически не будет изменено влиянием горных работ. В первом приближении можно считать, что исследуемый участок находится в плоском деформированном состоянии [4]. Прообразом задачи служит выработка на Таштагольском руднике находящаяся на глубине 890 м.

Геометрические значения параметров исследуемой модели (рис. 1.): расчетная область имеет размер $L_x = 30$ м, $L_z = 30$ м, диаметр выработки 3 м, длина каждой из трех скважин, выходящих из выработки 10 м, их диаметр 0,1 м, длина каждой трещины гидроразрыва 0,8 м; шаг дискретизации по пространству

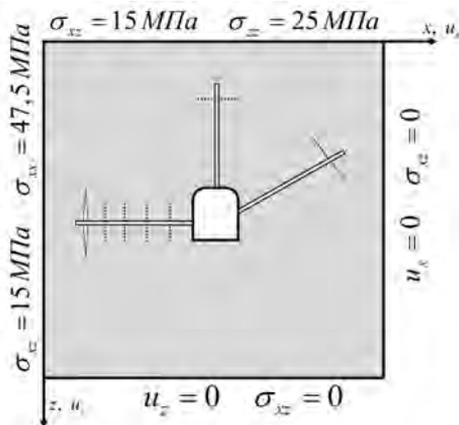


Рис. 1. Схема расчетной области и граничные условия

0,1 м. Наклонная скважина повернута на угол 20° к горизонту. Физические свойства: плотность $\rho = 3,8 \text{ т/м}^3$, модуль Юнга $E = 62 \text{ ГПа}$ и коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$.

Для того что бы определить неизвестные напряжения (σ_{xx} , σ_{zz} , σ_{xz}) мы проводим по 5 гидроразрывов на каждую скважину. Таким образом мы усредняем структурные особенности массива и ошибки при измерении и повышаем точность определения искомым параметров. Расстояние между двумя соседними трещинами гидроразрыва 2 м. Такого расстояния вполне достаточно, что бы соседние трещины не оказывали влияние друг на друга [5].

Деформирование среды описывается системой уравнений линейной теории упругости: уравнения равновесия (1), закон Гука (2) и соотношения Коши (3).

$$\sigma_{ij,j} + \rho g \delta_{iz} = 0, \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = 0,5(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (3)$$

где σ_{ij} и ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и деформаций ($i, j = x, z$); $\varepsilon = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz}$ – объемная деформация, u_i – смещения; λ и μ – параметры Ламе; δ_{ij} – дельта Кронекера.

На границе расчетной области сформулируем следующие условия (рис. 1):

$$\sigma_{xx}(0, z) = 47,5 \text{ МПа}, \sigma_{xz}(0, z) = 15 \text{ МПа}; \quad (4)$$

$$u_x(L_x, z) = 0, \sigma_{xz}(L_x, z) = 0; \quad (5)$$

$$\sigma_{zz}(x, 0) = 25 \text{ МПа}, \sigma_{xz}(x, 0) = 15 \text{ МПа}; \quad (6)$$

$$u_z(x, L_z) = 0, \sigma_{xz}(x, L_z) = 0. \quad (7)$$

Контур выработки свободен от напряжений.

Расчеты осуществлялись с использованием оригинального кода [6], реализующего 2D метод конечных элементов для структурно-неоднородных сред с нарушениями сплошности.

Построение и анализ целевых функций

В каждой из трех скважинах мы последовательно проводим 5 гидроразрывов и определяем в них давление запириания. Эти данные будут входными для решения обратной задачи.

На трещину гидроразрыва, заполненной идеальной жидкостью действует нормальное напряжение [7]:

$$\sigma = \sigma_{xx} \sin^2 \alpha + \sigma_{zz} \cos^2 \alpha - \sigma_{xz} \sin 2\alpha \quad (8)$$

Считаем, что трещина распространяется перпендикулярно скважине, угол α – угол между трещиной и осью x .

Введем целевую функцию:

$$F(\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}) = \sum_{n=1}^{15} \left[\sigma_n^{теор}(\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}) - \sigma_n^{изм} \right]^2,$$

где $\sigma^{теор}(\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz})$ соответствует теоретически рассчитанному напряжению, которое действует по нормали к трещине, а $\sigma^{изм}$ – давления запираения, которое мы измеряем в трещине гидроразрыва, n – номер трещины гидроразрыва. В общем случае, $\sigma^{изм}$ зависит от $\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}, E, \nu, l$ (где l – длина трещины), в первом приближении будем пренебрегать объемом закаченной жидкости в трещину, поэтому $\sigma^{изм}$ будет зависеть только от внешних напряжений.

Проведем анализ целевой функции F с использованием синтетических входных данных. Для этого в качестве измеренного давления запираения мы будем принимать теоретически рассчитанное напряжение при известных значениях $\sigma_{xx}^*, \sigma_{zz}^*, \sigma_{xz}^*$. Эти значения мы и будем «искать» при решении обратной задачи. Решение задачи сводится к нахождению минимума целевой функции, найдя минимум, определим значения неизвестных параметров $\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}$.

Входные данные рассчитывались следующим образом:

$$\sigma^{изм} = (1 + \delta) \left[\sigma_{xx}^* \sin^2 \alpha + \sigma_{zz}^* \cos^2 \alpha - \sigma_{xz}^* \sin 2\alpha \right],$$

где δ – равномерно распределенная на отрезке $[-\xi, \xi]$ случайная величина (ξ – амплитуда помехи); $\sigma_{xx}^*, \sigma_{zz}^*, \sigma_{xz}^*$ – точное решение обратной задачи, помеченное далее на рисунках белым кружком.

Анализ структуры целевых функций

На рис. 2 представлены изолинии целевой функции F при различных уровнях ошибки во входных данных ξ (от 5% до 20%). Темными зонами обозначены области эквивалентности, в которых значение целевых функций меняется менее чем на 0,5%, белыми кружками – точное решение. Изолинии построены для двух аргументов целевой функции σ_{xx}, σ_{zz} , третья переменная фиксировалась на уровне $\sigma_{xz} = \sigma_{xz}^*$.

Видно, что целевая функция имеет единственное решение. Характерная структура изолиний говорит о том, что решение обратной задачи можно успешно искать градиентными методами [8]. Отметим, что имея ошибку в 20% можно получить значение напряжений с точностью порядка 10%.

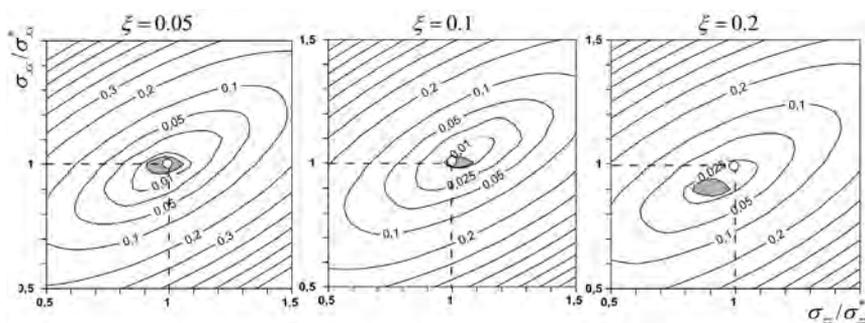


Рис. 2. Изолинии целевой функции F при различных ошибках во входных данных ξ , при $\sigma_{xz} = \sigma_{xz}^*$

Увеличение амплитуды ошибки во входных данных не приводит к такому же увеличению ошибки в решении. Так при уровне ошибки в 30% (рис. 3) ошибка в определении σ_{xx} составляет 20%, а σ_{xz} — порядка 10%. Это связано с тем, что мы измеряем значения напряжения (нормальное давление в трещине гидроразрыва) в нескольких точках на скважине и используем случайную ошибку в расчетах.

Лабораторные испытания

Были проведены лабораторные испытания по измерению приложенного давления (одноосное нагружение) на трещину гидроразрыва на кубах из органического стекла ($180 \times 170 \times 180$ мм). Приложенное напряжение вычисляется по тензодатчику, расположенному между верхней поверхностью куба и прессом. Затем в кубе сверлится отверстие имитирующее скважину, соз-

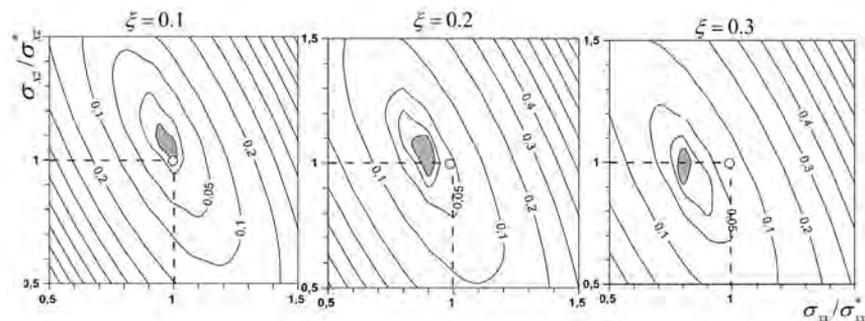


Рис. 3. Изолинии целевой функции F при различных ошибках во входных данных ξ , при $\sigma_{zz} = \sigma_{zz}^*$

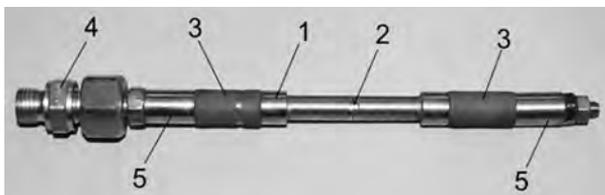


Рис. 4. Макет зонда с полиуретановыми пакерами: 1 – центральная вставка на корпусе зонда; 2 – отверстие для подачи флюида в межпакерное пространство; 3 – полиуретановые пакера; 4 – переходник для соединения с напорной магистралью; 5 – втулки для осевого поджатия пакеров

даются инициирующие щели, задающие ориентацию трещины, и помещается лабораторный зонд гидроразрыва (рис. 4) [9].

После образования трещины куб переворачивают так, что плоскость трещины оказалась параллельной сжимающим плитам пресса. После чего проводят повторное закачивание жидкости до момента раскрытия трещины (без прироста ее длины). В ходе эксперимента фиксируются данные о давлении жидкости во времени $p(t)$. По результатам анализа диаграмм серии лабораторных испытаний найдено, что максимально приближенное значение для определения приложенной нагрузки показывают методы $P/\text{LOG}(T)$ и $P/\text{LOG}(T)/\Delta T$ (таблица).

Заключение

Предложен метод количественной оценки компонент природного поля напряжения в нетронутом массиве на основе натурных данных о давлении запираения в серии трещин гидроразрыва. Что бы определить полный тензор напряжений необходимо провести измерения в двух перпендикулярных выработках. По результатам численных экспериментов установлено, что

Значения приложенного напряжения вычисленного по диаграмме нагружения $p(t)$ различными методами

Приложенное напряжение $\rho = 3,25$ МПа	
Метод:	Значение, МПа
Касательная	3,8
$P/\text{LOG}(T)$	3,2
$P/(\text{LOG}(T)/\Delta T)$	3,2
$\text{LOG}(P)/\text{LOG}(T)$	1,84
$(dP/dT)/T$	3,1

увеличение количества гидроразрывов повышает точность определения напряжений. По результатам лабораторных испытаний выявлен наиболее точный метод определения приложенного напряжения на диаграмме давления от времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М. В., Попов С. Н. Теоретические основы определения напряжений в горных породах. — Новосибирск: Наука, Сиб. Отд-ние, 1983. — 96 с.
2. Гребенкин С. С., Павлыш В. Н., Самойлов В. Л., Петренко Ю. А. Управление состоянием массива горных пород. — Донецк: ДонНТУ, 2010. — 194 с.
3. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. — Л.: Недра, 1989. — 488 с.
4. Jaeger J. C., Cook N. G. W. Fundamentals of Rock Mechanics. — London, Methuen, 1969. — p. 513.
5. Шер Е. Н., Кольхалов И. В., Михайлов А. М. Моделирование развития осесимметричных трещин при множественном гидроразрыве // ФТПРПИ. — 2013. — № 5. — С. 70–79.
6. Nazarova L. A. Stress State of Sloping-Bedded Rock Mass Around a Working, Soviet Mining Science, 21(2), 1985. — pp. 132–136.
7. Кошелев А. И., Нарбут М. А. Механика деформируемого твердого тела. — СПб.: СПбГУ, 2002. — 286 с.
8. Кабанихин С. И. Обратные и некорректные задачи. — Новосибирск: Сибирское научное изд., 2009. — 457 с.
9. Леонтьев А. В., Попов С. Н. Опыт практического применения измерительного гидроразрыва // Горный журнал. — 2003. — № 3. **ГИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Панов Антон Владимирович*¹ — аспирант, e-mail: anton-700@yandex.ru,
*Скулкин Александр Александрович*¹ — аспирант, e-mail: chuptt@yandex.ru,
Цибизов Леонид Валерьевич — аспирант,
Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет, e-mail: tsibizov.lv@gmail.com,
Родин Роман Иванович — аспирант, Институт угля СО РАН,
e-mail: rodinri@mail.ru,

¹ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 6, pp. 381–388.

UDC
539.3+517.95

A.V. Panov, A.A. Skulkin, L.V. Tsibizov, R.I. Rodin
IN SITU STRESS EVALUATION BY SOLVING
INVERSE PROBLEM BASED ON HYDROFRACTURING
STRESS MEASUREMENTS

The author proposes the method to evaluate in situ stresses in intact rocks based on pressure measurements in a system of hydrofracs in three wells drilled in a remote excavation and substantiates the relevance of the results using finite element modeling and laboratory

testing. The research features the developed procedure to evaluate external stresses in a plane oriented in perpendicular to the excavation using the method of hydraulic fracturing and solving inverse problem with data on pressure–time measurements in the well and with minimized influence of any errors and uncertainties due to rock mass behavior or measurement equipment.

Key words: inverse problem, hydrofracturing, stress measurement, underground excavation, modeling, finite element method, laboratory testing.

AUTHORS

*Panov A.V.*¹, Graduate Student,

e-mail: anton-700@yandex.ru,

*Skulkin A.A.*¹, Graduate Student,

e-mail: chuptt@yandex.ru,

Tsibizov L.V., Graduate Student, e-mail: tsibizov.lv@gmail.com,

Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia,

Rodin R.I., Graduate Student, e-mail: rodinri@mail.ru,

Institute of Coal of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,

650065, Kemerovo, Russia,

¹ Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch

of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 14-0531482mol_a.

REFERENCES

1. Kurlenya M.V., Popov S.N. *Teoreticheskie osnovy opredeleniya napryazheniy v gornykh porodakh* (Theoretical principles of determination of rock stress), Novosibirsk, Nauka, Sibirskoe Otdelenie, 1983, 96 p.
2. Grebenkin S.S., Pavlysh V.N., Samoylov V.L., Petrenko Yu.A. *Upravlenie sostoyaniem massiva gornykh porod* (Rock mass condition control), Donetsk, DonNTU, 2010, 194 p.
3. Turchaninov I.A., Iofis M.A., Kaspar'yan E.V. *Osnovy mekhaniki gornykh porod* (Basics of rock mechanics), Leningrad, Nedra, 1989, 488 p.
4. Jaeger J.C., Cook N.G.W. *Fundamentals of Rock Mechanics*. London, Methuen, 1969, p. 513.
5. Sher E.N., Kolykhalov I.V., Mikhaylov A.M. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2013, no 5, pp. 70–79.
6. Nazarova L.A. Stress State of Sloping–Bedded Rock Mass Around a Working, *Soviet Mining Science*, 21(2), 1985. pp. 132–136.
7. Koshelev A.I., Narbut M.A. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* (Mechanics of deformable solid), Saint-Petersburg, SPbGU, 2002, 286 p.
8. Kabanikhin S.I. *Obratnye i nekorrektnye zadachi* (Inverse and ill-posed problems), Novosibirsk, Sibirskoe nauchnoe izd., 2009, 457 p.
9. Leont'ev A.V., Popov S.N. *Gornyy zhurnal*. 2003, no 3.

