

ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

Тема работы:

Определение горизонтальных составляющих природного поля напряжений по данным измерительного гидроразрыва

Информация о коллективе:

Панов Антон Владимирович, м.н.с., Институт горного дела СО РАН
Александр Александрович Скулкин, м.н.с., Институт горного дела СО РАН
Аркадий Васильевич Леонтьев, д.т.н., в.н.с. Институт горного дела СО РАН
Назаров Леонид Анатольевич, д.физ.-мат.н., Институт горного дела СО РАН.

Аннотация

Разработан метод реконструкции напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности подземных объектов, основанный на решении обратных задач определения составляющих внешнего поля напряжений по данным о параметрах геомеханических полей в дискретном множестве точек. В качестве входной информации могут, в частности, выступать результаты геодезических и деформографических *in situ* измерений. Метод апробирован с использованием данных измерительного гидроразрыва, полученных в ходе натуральных экспериментов на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей. С учетом геологической и геотехнической информации о структуре вмещающего массива и конфигурации выработанного пространства построена и методом конечных элементов реализована геомеханическая модель месторождения. Показана разрешимость сформулированной обратной граничной задачи определения величины и ориентации горизонтальных компонент σ_1 и σ_2 природного поля напряжений.

Постановка задачи

Разработана геомеханическая модель горизонтального сечения зоны отработки рудников. Расчетная область G – прямоугольник $\{0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y\}$ с размерами $L_x = 100$ км $L_y = 88$ км по соответствующим осям декартовой системы координат (x, y) , ось ординат ориентирована на север. На рис. 1 представлена центральная часть G и граничные условия, темной линией показана граница обрабатываемой зоны. Месторождение разрабатывается камерно-столбовой системой с оставлением целиков, ширина которых примерно равна ширине добычных выработок. Это было учтено при задании деформационных свойств (модуль Юнга E , коэффициент Пуассона ν) и плотности ρ «выработанного пространства» и «вмещающих пород», представленных в Табл. 1.

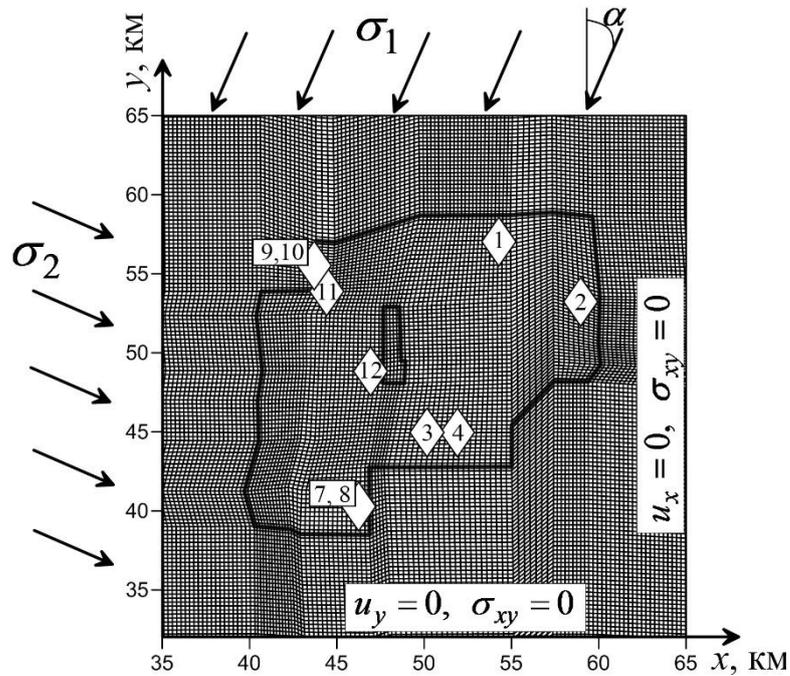


Рис. 1. Фрагмент дискретизации расчетной области на конечные элементы и граничные условия. Ромбы – пункты, в которых измерялись напряжения методом гидроразрыва

Таблица 1

Механические свойства пород

Порода	E , ГПа	ν	ρ , кг/м ³
Каменная соль	5.1	0.3	2050
Выработанное пространство	2.5	0.3	1000

В области G генерировалась сетка четырехугольных элементов. На ∂G формулировались граничные условия:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx}(0, y) &= \sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_2 \cos^2 \alpha, & u_x(L_x, y) &= 0; \\
 \sigma_{xy}(0, y) &= 0.5(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\alpha, & \sigma_{xy}(L_x, y) &= 0; \\
 \sigma_{yy}(x, L_y) &= \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \sin^2 \alpha, & u_y(x, 0) &= 0; \\
 \sigma_{xy}(x, L_y) &= 0.5(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\alpha, & \sigma_{xy}(x, 0) &= 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где σ_1 и σ_2 – главные напряжения в естественном поле (вне зоны влияния горных работ), $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ – компоненты тензора напряжения; u_x, u_y – смещения; α – угол между направлением действия главного напряжения σ_1 и осью y .

Деформирование среды при ведении горных работ описывалось системой уравнений линейной теории упругости, состоящей из уравнений равновесия (2), закона Гука (3) и соотношений Коши для малых деформаций (4).

$$\sigma_{ij,j} = 0; \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})\delta_{ij} + 2\mu\varepsilon_{ij}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (4)$$

где λ, μ – параметры Ламе (выражаются через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν по известным формулам [14]), ε_{ij} – компоненты тензора деформаций, δ_{ij} – дельта Кронекера, $(i, j = x, y)$.

Прямая задача (1)-(4) решалась методом конечных элементов с использованием оригинального кода.

Сформулируем граничную обратную задачу: определить компоненты внешнего поля напряжений (σ_1, σ_2) и их ориентацию (угол α) по данным измерения напряжений в дискретном множестве точек.

В натуральных условиях методом гидроразрыва были определены минимальное S_2 и максимальное S_1 напряжения в $N = 10$ пунктах с координатами (x_n, y_n) (рис. 1).

Введем целевую функцию:

$$\Psi(\sigma_1, \sigma_2, \alpha) = \frac{\sqrt{N \sum_{n=1}^N [D_1^2 + D_2^2]}}{\sum_{n=1}^N [S_1(x_n, y_n) + S_2(x_n, y_n)]}, \quad (5)$$

где $D_m = s_m(x_n, y_n, \sigma_1, \sigma_2, \alpha) - S_m(x_n, y_n)$, $(m = 1, 2)$, а s_2 и s_1 – минимальное и максимальное главные напряжения тензора σ_{ij} , рассчитанные теоретически при некоторых значениях σ_1 , σ_2 и α . Минимум функции Ψ доставляет решение сформулированной обратной задачи. Последняя относится к граничному типу, что позволяет воспользоваться эффективным расчетным алгоритмом, основанном на разделении прямого и обратного хода при решении системы линейных уравнений относительно узловых смещений (глобальная матрица жесткости).

Рис. 2 демонстрирует изолинии Ψ в различных сечениях, которые показывают, что целевая функция – унимодальная и обратная задача разрешима. Темные зоны – области эквивалентности, где значение $\Psi < 0.5$. Таким образом, искомые компоненты природного поля напряжений лежат в диапазонах: $13 \leq \sigma_2 \leq 15$ МПа, $21 \leq \sigma_1 \leq 26$ МПа, а угол α между направлением на север и σ_1 изменяется от -10° до 15° .

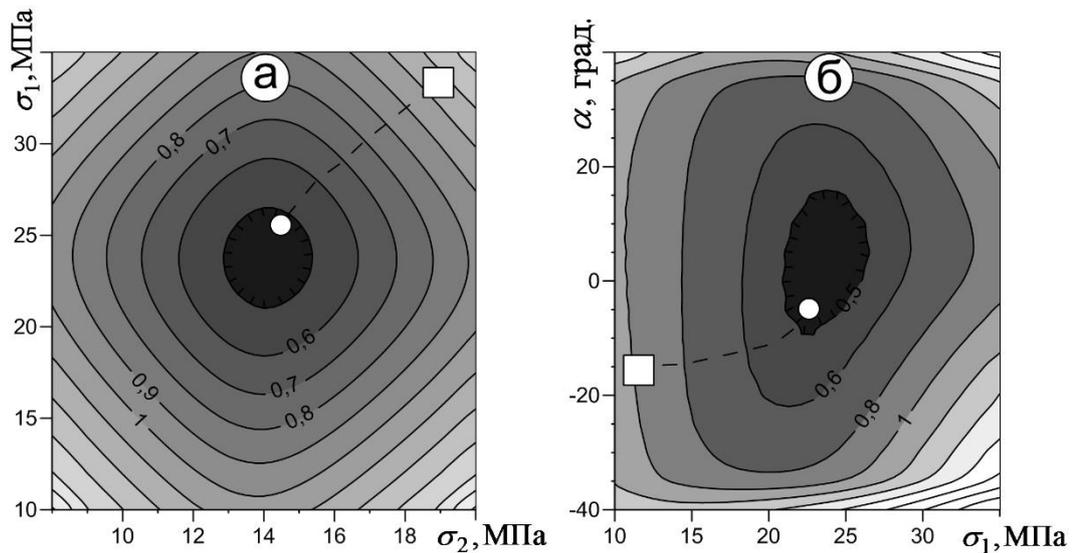


Рис. 2. Изолинии целевой функции Ψ в различных сечениях:

а) $\alpha = 5^\circ$; б) $\sigma_2 = 14$ МПа

Результаты расчетов – линии уровня нормальных компонент тензора напряжений для $\sigma_2 = 15$ МПа, $\sigma_1 = 24$ МПа и $\alpha = -7^\circ$ (точка минимума целевой функции Ψ) представлены на рис. 3. Как и следовало ожидать, концентрация напряжений имеет место в краевых зонах очистного пространства, в отработанной части – закономерное уменьшение напряжений.

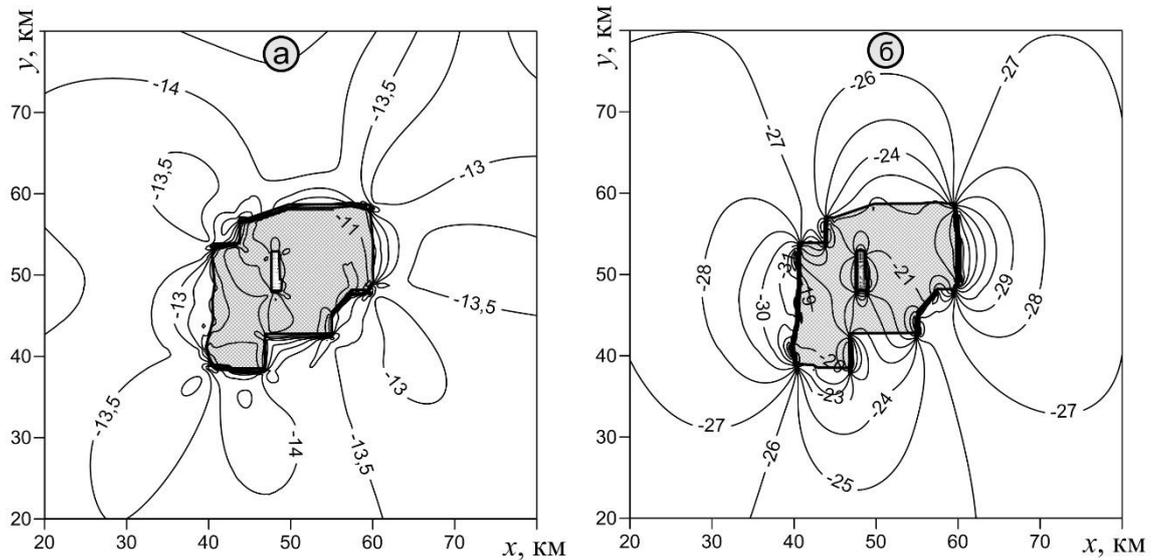


Рис. 3. Изолинии нормальных компонент (МПа) тензора напряжения: а) σ_{xx} ; б)

σ_{yy}

Разработан и алгоритмически реализован подход к реконструкции напряженно-деформированного состояния массива горных пород, основанный на решении обратной граничной задачи определения горизонтальных составляющих природного поля напряжений по результатам измерения параметров геомеханических полей в зоне ведения

горных работ. Подход апробирован на данных, полученных методом измерительного гидроразрыва на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей. Оказалось, что минимальная σ_2 и максимальная σ_1 горизонтальные компоненты лежат в диапазонах: $13 \leq \sigma_2 \leq 15$ МПа, $21 \leq \sigma_1 \leq 26$ МПа, а угол между направлением на север и σ_1 может варьироваться от -10° до 15° . Верифицированная таким образом геомеханическая модель месторождения может быть в дальнейшем использована для обоснования технологии выемки запасов.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Проведение численного моделирования с использованием достаточно мелкой сетки расчетной области невозможно на обычных стационарных компьютерах в следствии большого объема требуемой памяти и времени расчетов. Использование кластера позволило запускать сразу несколько расчетов для отладки, проверки, настройки алгоритма расчетов, вариации и анализа целевого функционала.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы:

1. *Панов А.В., Скулкин А.А., Леонтьев А.В., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Мирошниченко Н.А., Рубцова Е.В. Определение горизонтальных составляющих природного поля напряжений по данным измерительного гидроразрыва* Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 6 т. Т. 6. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – (352 с.) С.126-135. (Импакт-фактор РИНЦ 0,111).