ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

Тема работы:

Определение деформационных свойств пород и компонент природных напряжений по данным подземной геодезии

Информация о коллективе:

Панов Антон Владимирович, м.н.с., Институт горного дела СО РАН
Назаров Леонид Анатольевич, д.физ.-мат.н., Институт горного дела СО РАН.

Аннотация

Разработана и методом конечных элементов реализована трехмерная геомеханическая модель типичной конфигурации подземного пространства при реализации камерно-столбовой системы отработки пластовых месторождений. Сформулирована и исследована на разрешимость обратная задача определения величины и ориентации горизонтальных компонент внешнего поля напряжений и деформационных характеристик конструктивных элементов технологии выемки по данным измерения конвергенции стенок очистных камер по мере развития горных работ. Проанализированы линии уровня различных целевых функций и показана разрешимость сформулированной смешанной обратной задачи, установлена зависимость размеров области эквивалентности от относительной погрешности во входных данных.

Постановка задачи

Рассмотрим фрагмент типичной конфигурации подземного пространства, возникающего при реализации камерно-столбовой системы отработки пластового месторождения неглубокого субгоризонтального залегания с оставлением ленточных целиков, характерной для калийных рудников. На рис. 1а показано вертикальное сечение исследуемого объекта, на рис. 1б – горизонтальное сечение ($y = -20\,м$).

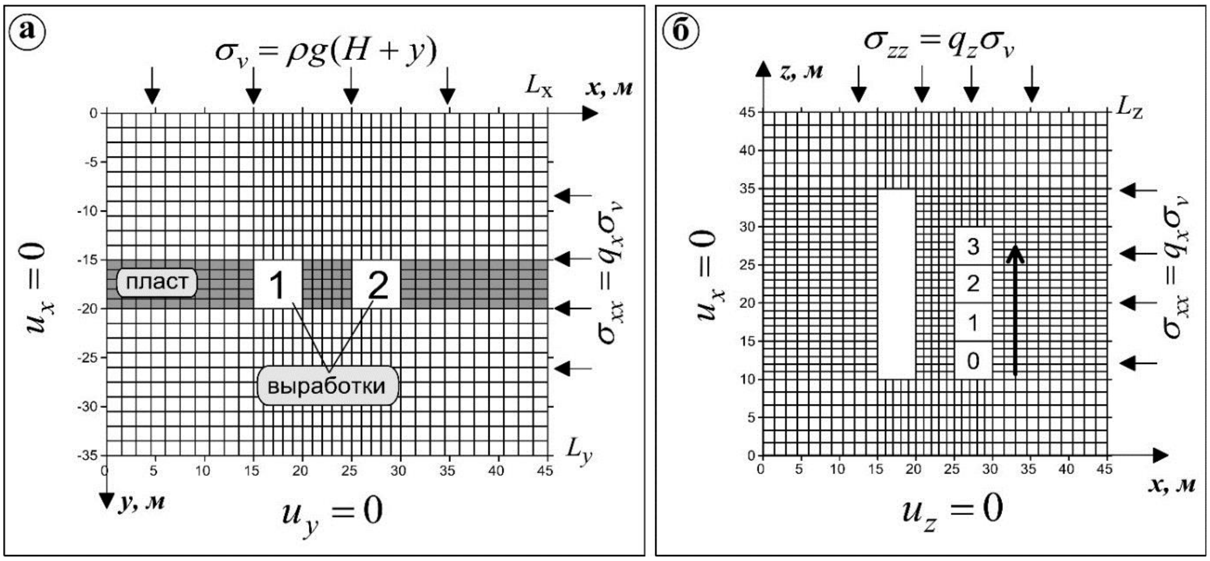

Рис. 1. Дискретизации расчетной области на конечные элементы и граничные условия

Исследуемый участок располагается на глубине $H = 300\,м$. Размер исследуемой области $L_x = 45\,м$, $L_z = 45\,м$, $L_y = 35\,м$. В пласте мощностью 5 м пройдена выработка 1. Выработка 2 отрабатывается пошагово, с шагом 5 м. Направление отработки показано стрелкой на рис. 1б. После каждого шага регистрируются вертикальные и горизонтальные смещения контура выработки 1. Контрольные точки для измерения вертикальных U_y и горизонтальных U_x смещений контура расположены вдоль первой выработки по оси *z* с промежутком 1 м (рис. 2). Между выработками располагается предохранительный целик. Геометрические размеры выработок и целика в вертикальном сечении – 5*5 м. Физические свойства (плотность ρ, модуль юнга E и коэффициент Пуассона ν) слагающих массив пород приведены в табл. 1. Расчетная область располагается под действием вертикального σ_v и двух горизонтальных σ_x, σ_z сжимающих напряжений. Вертикальное напряжение соответствует весу вышележащих пород, а горизонтальное характеризуется коэффициентами бокового отпора q_x, q_z.

Таблица 1

Физические свойства пород

Порода	ρ, кг/м^3	E, ГПа	ν
Вмещающая среда	2500	2	0.3
Пласт	2400	1.7	0.3

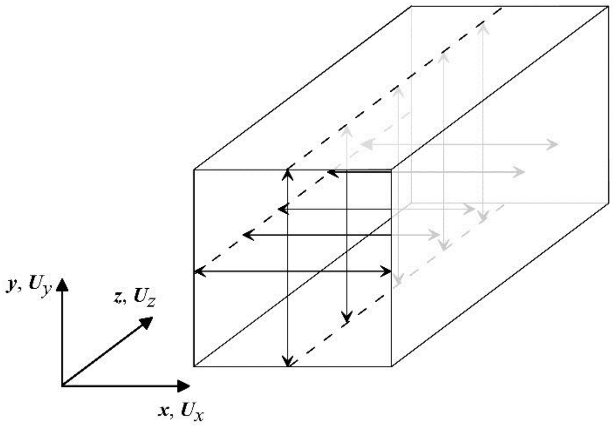

Рис. 2. Места измерения горизонтальных и вертикальных смещений вдоль первой выработки

Для описания деформирования породного массива воспользуемся системой уравнений линейной теории упругости, включающей уравнения равновесия(1), закон Гука (2) и соотношений Коши для малых деформаций (3)

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

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \tag{2}$$

$$\varepsilon_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i}), \tag{3}$$

где σ_{ij} и ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и деформаций ($i, j =$ *x*,*y*,*z*), u_i – смещения, ρ – плотность пород, g – ускорение свободного падения, δ_{ij} – символ Кронекера, λ и μ параметры Ламе.

На границе расчетной области сформулируем следующие условия:

$$\sigma_{xx}(L_x, y, z) = q_x \sigma_v, \tag{4}$$

$$\sigma_v(x, 0, z) = \rho g(H + y) \tag{5}$$

$$\sigma_{zz}(x, y, L_z) = q_z \sigma_v, \tag{6}$$

$$u_x(0, y, z) = 0, \tag{7}$$

$$u_y(x,-L_y,z)=0, \quad (8)$$

$$u_z(x,y,0)=0. \quad (9)$$

Предположим, что выработки ориентированы по направлению главных сжимающих напряжений, касательные напряжения на границе расчетной области равны нулю:

$$\sigma_{xy}=\sigma_{xz}=\sigma_{yz}=0. \quad (10)$$

Контуры выработок свободны от напряжений. Коэффициенты бокового отпора в расчетах были равны: $q_x=0.5,\ q_z=0.8$.

Расчеты осуществлялись с использованием оригинального кода, реализующего 3D метод конечных элементов для структурно-неоднородных сред с нарушениями сплошности. В расчетной области генерировалась сетка четырехугольных элементов с линейными размерами 1 м, содержащая $35\cdot10^3$ узлов.

На рис.3 приведены горизонтальные и вертикальные смещения контура первой выработки при пошаговой отработке второй выработки. Можно отметить, что по мере развития горных работ наблюдается последовательное увеличение деформации рядом стоящей выработки

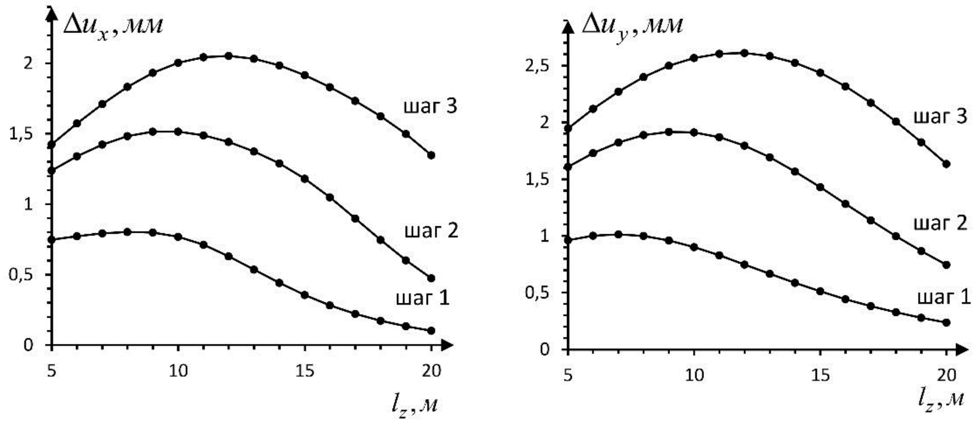

Рис. 3. Горизонтальные и вертикальные смещения контура первой выработки

На рис.4 приведена эволюция горизонтальной компоненты поля напряжений по мере отработки второй выработки. Отметим постепенное сгущение изолиний и повышение напряжений в зоне целика между выработками.

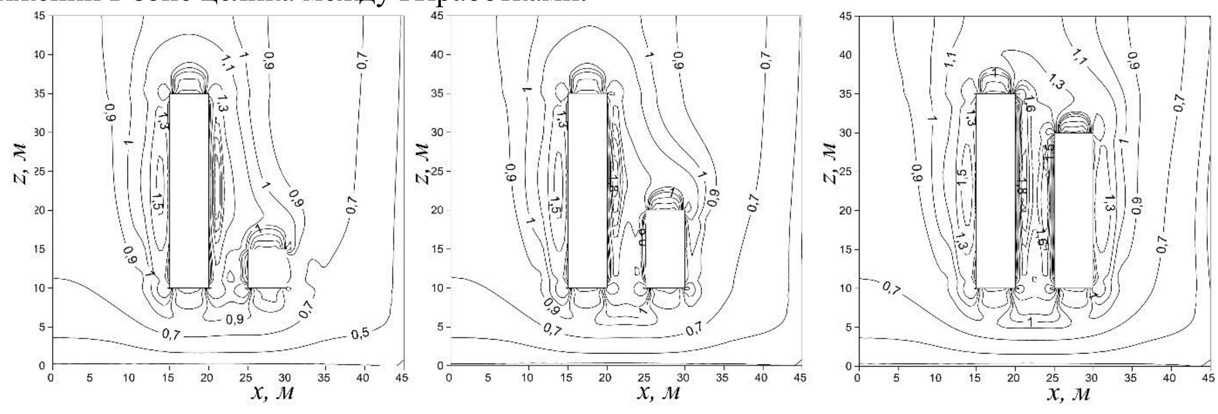

Рис. 4. Изолинии горизонтальной компоненты поля напряжений σ_{zz}

Сформулируем обратную задачу и исследуем ее на разрешимость: определить два коэффициента бокового отпора q_x, q_z и упругие характеристики (модуль Юнга E, коэффициент Пуассона ν) целика расположенного между двумя выработками по приращениям смещений, замеренным на контуре камеры 1 (рис. 1). Введем два функционала Φ_x, Φ_y, минимум которых даст решение задачи. Использование независимых двух целевых функционалов обеспечивает с одной стороны дополнительный контроль решения задача, а с другой делает метод более гибким и менее зависимым от шахтных условий и возможностей оборудования.

$$\Phi_x = \sum_i \sum_n \left[\Delta U_x(z_n, E, \nu, \sigma_{xx}, \sigma_{zz}) - \Delta U_x^{real}(z_n) \right]^2 \tag{11}$$

$$\Phi_y = \sum_i \sum_n \left[\Delta U_y(z_n, E, \nu, \sigma_{xx}, \sigma_{zz}) - \Delta U_y^{real}(z_n) \right]^2 \tag{12}$$

где i соответствует номеру шага при образовании второй выработки (i=1,2,3), n – количество точек вдоль измерительной выработки, z_n - координата вдоль оси z, задающая местоположение пунктов измерений смещений контура выработки. $\Delta U_x(z_n, E, \nu, \sigma_{xx}, \sigma_{zz})$ и $\Delta U_y(z_n, E, \nu, \sigma_{xx}, \sigma_{zz})$ - расчетные значения дивергенции боковых стенок и кровли и почвы в измерительной выработке. $\Delta U_x^{real}(z_n)$, $\Delta U_y^{real}(z_n)$ - результаты натурных измерений. При численном моделировании в качестве последних использовались синтетические данные:

$$\begin{aligned} \Delta U_x^{real}(z_n) &= (1+\xi)\Delta U_x(z_n, E^*, \nu^*, \sigma_{xx}{}^*, \sigma_{zz}{}^*), \\ \Delta U_y^{real}(z_n) &= (1+\xi)\Delta U_y(z_n, E^*, \nu^*, \sigma_{xx}{}^*, \sigma_{zz}{}^*) \end{aligned} \tag{13}$$

где $E^*, \nu^*, \sigma_{xx}{}^*, \sigma_{zz}{}^*$ – искомые значения параметров (точное решение), ξ – равномерно распределенная на отрезке $\left[-A_{err}; A_{err}\right]$ случайная величина, имитирующая мультипликативный шум. Амплитуда случайной ошибки A_{err} варьировалась в пределах от 10% до 30%.

На рис. 5 представлены изолинии целевой функции Φ_x и Φ_y для с уровнем ошибок во входных данных 20-30% в сечении $q_x = q_x^*, q_z = q_z^*$ ($\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^*, \sigma_{zz} = \sigma_{zz}^*$). Видно, что целевая функция унимодальна и имеет один минимум. Серым кружком отмечено точное решение. Белая область – область минимума целевой функции. Как видно не всегда область минимума функции совпадает с точным решением, но ее размер и положение около точного решения говорит о целесообразности использования этой целевой функции для нахождения искомых параметров E, ν. Так при уровне ошибки во входных данных 30% (рис.5б) можно найти E и ν с точностью 10%. Целевая функция Φ_y (рис. 5в) имеет ярко выраженную овражью структуру, она не позволяет отыскать коэффициент Пуассона, но Модуль Юнга целика находится так же с точностью 10%.

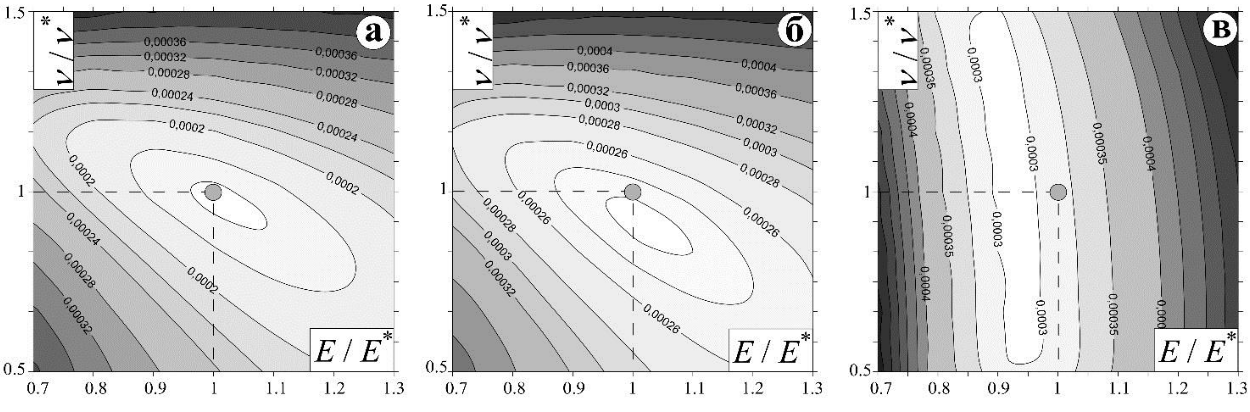

Рис. 5. Изолинии целевых функций: а) Φ_x с амплитудой ошибки 20%, б) Φ_x с амплитудой ошибки 30%, в) Φ_y с амплитудой ошибки 30%

На рис. 6 представлены изолинии целевой функции Φ_x и Φ_y для с уровнем ошибок во входных данных 10-30% в сечении $E = E^*, \nu = \nu^*$. Серый кружок – точное решение, белая область – область минимумам целевой функции. Видно, что целевая функция Φ_x (рис. 6а,б) имеет один минимум, но он растянут, так что нет возможности отыскать параметр q_z, однако, q_x находится достаточно точно (отклонение 10% от точного решения), даже при большой ошибке в 30%. Целевая функция Φ_y (рис. 6в) не подходит для определения параметров q_x, q_z даже при относительно небольшом уровне ошибки во входных данных.

Видно, что целевая функция унимодальна и имеет один минимум. Серым кружком отмечено точное решение. Белая область – область минимума целевой функции. Как видно не всегда область минимума функции совпадает с точным решением, но ее размер и положение около точного решения говорит о целесообразности использования этой целевой функции для нахождения искомых параметров E, ν. Так при уровне ошибки во входных данных 30% (рис.5б) можно найти E и ν с точностью 10%. Целевая функция Φ_y (рис. 5в) имеет ярко выраженную овражью структуру, она не позволяет отыскать коэффициент Пуассона, но Модуль Юнга целика находится так же с точностью 10%.

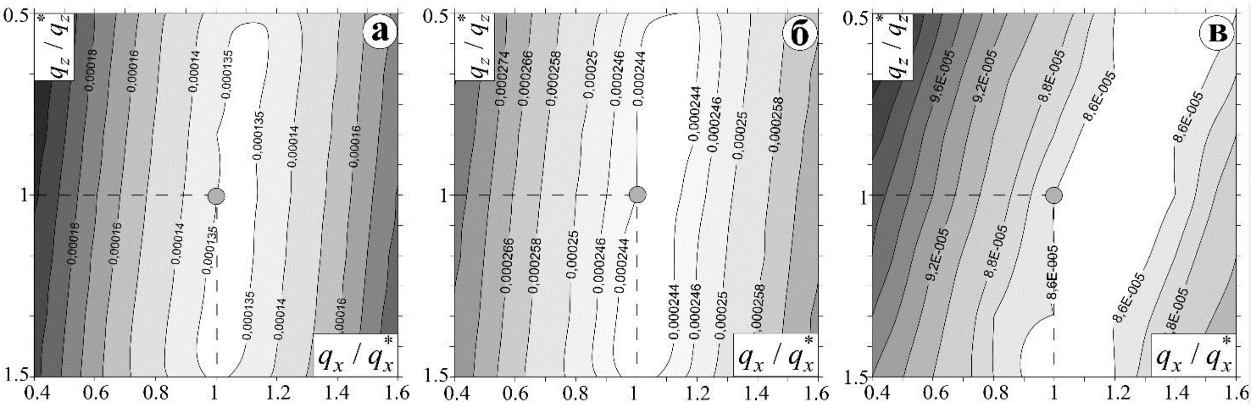

Рис. 6. Изолинии целевых функций: а) Φ_x с амплитудой ошибки 20%, б) Φ_x с амплитудой ошибки 30%, в) Φ_y с амплитудой ошибки 10%

Сформулирована обратная зада для поиска двух горизонтальных компонент поля сжатия и упругих характеристик целика, проанализированы структуры целевых функций. Выявлена наиболее предпочтительная функция Φ_x, которая позволяет находить модуль Юнга и коэффициент Пуассона целика, одну из компонент внешнего поля сжатия σ_{xx} с точностью 10% (при уровне ошибки во входных данных не более 30%). Для реализации данного подхода необходимо регистрировать относительные горизонтальные смещения контура имеющейся выработки при проведении очистных работ в рядом стоящей выработке. Таким образом мониторинг может осуществляться в процессе ведения горных работ методами подземной геодезии.

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. Пошаговый алгоритм поставленной задачи позволил запускать сразу несколько расчетов одновременно, для настройки алгоритма расчетов, вариации и анализа целевого функционала. Тем самым значительно сокращая расчетное время.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы:

1. *Панов А. В., Назаров Л. А.* **Определение деформационных свойств пород и компонент природных напряжений по данным подземной геодезии** Сб. материалов XVII Междунар. науч. конгр. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск: СГУГиТ, 2021. – Т. 2. – №. 4. – С. 52-61. (Импакт-фактор РИНЦ 0,111).