

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС КОНТУРА ЗАКРЕПЛЕННОЙ ВЫРАБОТКИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В НЕОДНОРОДНО АНИЗОТРОПНОМ МАССИВЕ, ОТ ГЕОТЕКТОНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Из-за сложности решаемой задачи в такой постановке решим ее методом конечных элементов (МКЭ) /1/.

В МКЭ одним из важных этапов являются сборка глобальных матриц жесткости и векторов нагрузки, формирование и решение системы линейных алгебраических уравнений.

Матричное уравнение является стандартной формой записи системы линейных алгебраических уравнений метода конечных элементов:

$$[K]\{U\} = \{F_v\} + \{F_T\} \quad (1)$$

где K - глобальная матрица жесткости конечно-элементной модели; U - глобальный вектор степеней свободы модели; F_v - глобальный вектор узловых сил, статически эквивалентный заданным объемным силам; F_{TS} - глобальный вектор узловых сил, статически эквивалентный тектоническим силам.

Матрица жесткости конечных элементов формируется следующим образом /1/:

$$[k]^{e,ij} = \int_{\Omega^e} h^e [B^{e,ij}]^T [D]^e [B^{e,ij}] d\Omega, \quad (2)$$

где B^e - матрица градиентов элемента e ; $i, j = 1, 2, 3, \dots, 9$; D^e - матрица упругих модулей элемента e ; h^e - толщина элемента e ; Ω^e - площадь элемента e .

$$[k]^e = \{[k]^{e,ij}\}_{i,j=1}^9.$$

Матрица жесткости конечно-элементной модели формируется путем сложения по определенным правилам элементных матриц жесткости:

$$[K] = \sum_{e=1}^N [k]^e \quad (3)$$

Геостатическая сила вычисляется по следующему алгоритму, удобному для программирования:

$$\{P\}_q^e = \{P\}_q^e + \sum_{i=1}^9 \gamma^e H^i \Omega^e / 8, \quad (4)$$

где e - номер текущего элемента; $q = 1, 2, \dots, 8$ - порядковые номера узловых точек; γ^e - объемный вес, Ω^e - площадь e -го элемента; H^i соответствует расстоянию от земной поверхности до рассматриваемой точки интегрирования i и вычисляется через весовые коэффициенты α_i и координат ξ_i, η_i . В данной программе счета

количество внутренних точек интегрирования i для каждого элемента было принято равным 9 (рис. 1).

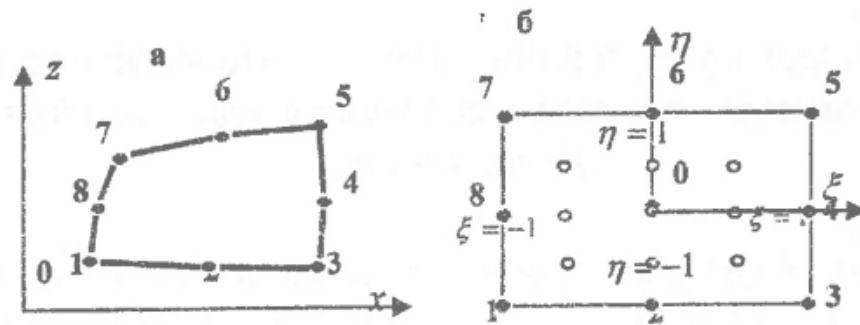


Рис. 1. Четырехугольный изопараметрический восьмиузловой элемент 2-го порядка сирендипового семейства: а - в декартовой xOz , б - в местной $\xi O\eta$ системах координат. Светлые кружочки - места внутренних точек интегрирования i /1/

Тектонические силы вычисляются аналогично (4) для суммирования

$$\{T\}_q^e = \{T\}_q^e + \sum_{i=1}^9 \bar{\beta}^e H^i S^e / 8, \quad (5)$$

где $\bar{\beta}^e$ - коэффициент тектонического сжатия, имеющий размерность, как и объемный вес γ , определяется из измеренных данных на шахтных выработках и скважинах. Вычисленные по выражению (6) тектонические силы аналогично объемному весу прикладываются к каждому узлу e -го элемента.

Систему уравнений (1) решается любым из численных методов, применяемых в МКЭ. Компоненты деформации и напряжений вычисляются с помощью матричных соотношений

$$\{\epsilon\}^y = [B]^y \{U\}, \quad (6)$$

$$\{\sigma\}^y = [D]\{\epsilon\}^y, \quad (7)$$

где $\{\epsilon\}$ и $\{\sigma\}$ - векторы компонент деформации и напряжений.

По алгоритмам (1)-(7) решена задача об определении НДС контура закрепленной выработки, находящейся в неоднородно анизотропном массиве, от геостатической и тектонической нагрузки. Расчетная область со смешанными граничными условиями показана на рис. 2.

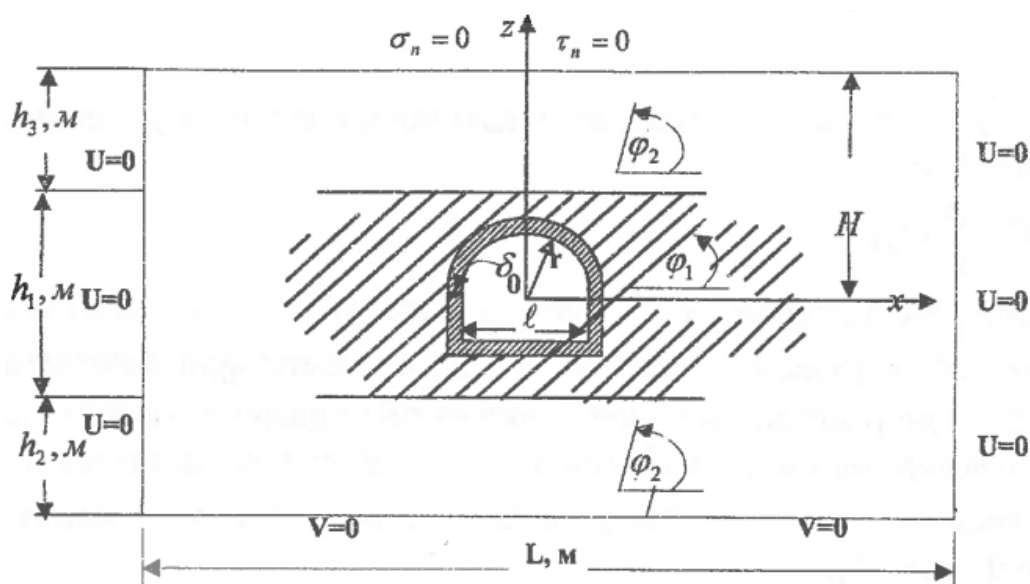


Рис. 2. Закрепленная с упругой бетонной крепью выработка находится в угольном пласте наклоннослоистого строения с углом наклонов к плоскости изотропии φ_1

Геометрические размеры: радиус выработки $r=2,5\text{м}$, толщина крепи $\delta=0,20\text{м}$, ширина выработки $l=10\text{м}$, толщина угольного пласта $h_1=20\text{м}$, ширина расчетной области $L=200\text{м}$. Выработка заложена в середине угольного пласта $h_1/2$. Высота скального массива снизу угольного слоя $h_2=90\text{м}$. Глубина заложения выработки от земной поверхности $H=h_3+h_1/2$ - переменная, поскольку h_3 - переменная. В качестве материала крепи принят бетон со следующими физико-механическими свойствами. Модуль Юнга - $E=2.32\text{Мпа}$, коэффициент Пуассона $\nu=0.22$, Объемный вес $\gamma=2.7\text{т/м}^3$.

Модуль Юнга крепи 2-3 раза больше, чем угольного слоя и скального массива. Тяжелое и по объемному весу. Массив находится направленным вниз в поле геостатических и горизонтально направленной тектонической силы.

На рис. 3 на глубине заложения выработки $H=200\text{м}$ от земной поверхности эпюры напряжений от геостатической нагрузки мало отличаются от симметричного случая. Концентрация напряжений наблюдаются в основном в областях углов затупления на лежащих боках. Величины концентрации упругих нормальных тангенциальных сжимающих напряжений $\sigma_{\theta n}^0$ во всех вариантах углов наклона плоскостей изотропии приблизительно одинаковые. Лишь при влиянии горизонтально направленной тектонической силы величины напряжений значительно увеличиваются. Почвенные области массива находятся в разгруженных состояниях.

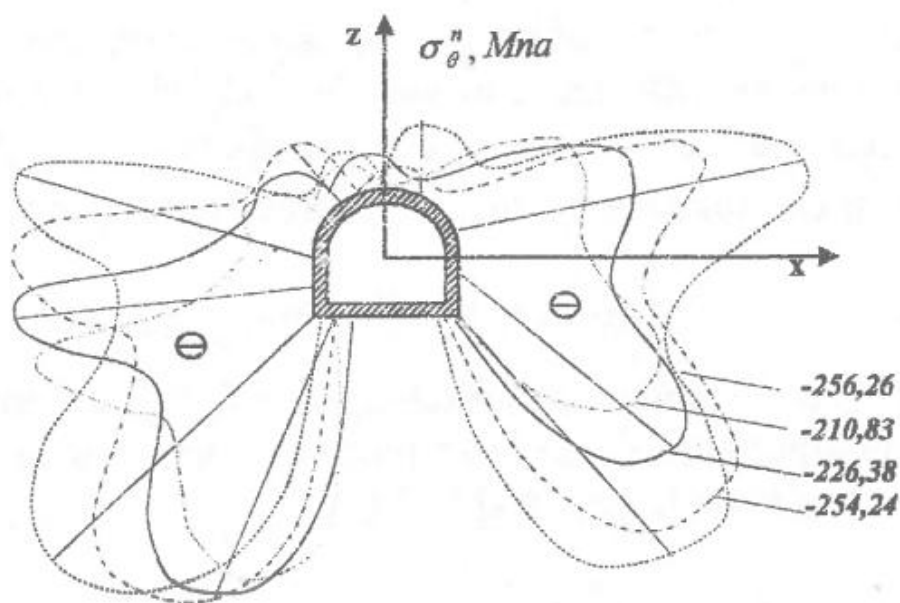


Рис. 3. Эпюры сжимающих упругих нормальных тангенциальных компонент напряжений σ_{θ}^n на внутреннем контуре закрепленной выработки от геостатической нагрузки при глубине заложения $H=200$ м, $\varphi_1=0$. Линии соответствуют: 1- $\varphi_2=0$; 2- $\varphi_2=30^\circ$; 3 - $\varphi_2=45^\circ$; 4 - $\varphi_2=60^\circ$

Теперь рассмотрим вариант учета влияния тектонической силы в случае, когда скальный массив сверху и снизу угольного слоя является горизонтально слоистым, а угольный пласт имеет наклоннослоистую структуру (рис. 1 и 4).

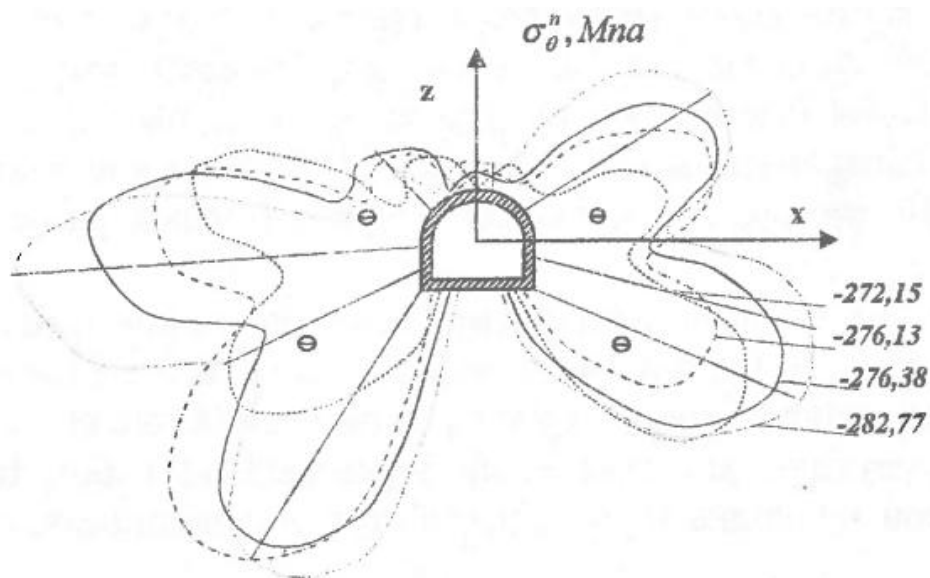


Рис. 4. Эпюры сжимающих упругих нормальных тангенциальных компонент напряжений σ_{θ}^n в контуре закрепленной выработки от тектонической нагрузки при глубине заложения $H=200$ м, $\varphi_2=0$. Цифры показывают значение напряжений в МПа. Линии соответствуют:

1- $\varphi_1=0$; 2- $\varphi_1=30^\circ$; 3- $\varphi_1=45^\circ$; 4- $\varphi_1=60^\circ$

В этом случае и на границах контакта разнородных массивов, и на внутреннем контуре выработки величины концентрации напряжений увеличиваются значительно. Значительные по величине сжимающие напряжения появляются и в областях правого висящего бока. Во всех рассмотренных вариантах как при геостатической, так и при тектонической нагрузке непосредственно над кровлей величина σ_{θ} намного меньше. Почвенная область здесь также находится в разгруженном состоянии.

Список литературы

1. Баймахан Р.Б. Расчет сейсмонапряженного состояния подземных сооружений в неоднородной толще методом конечных элементов / Под ред. Ш.М. Айталиева. – Алматы: Даур, 2002. – 231 с.