Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им.Г.В.Плеханова,
т. LXXXII, 1980 г.

УДК 622.3:69.05

# РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ ЦЕЛИК – КРОВЛЯ – ПОЧВА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.П.СКРИПКА

При разработке месторождений камерными и камерно-столбовыми системами одной из актуальных задач является определение устойчивости элементов систем целик – кровля – почва (ЦКП) с учетом их внешних очертаний, реального строения и свойств слагающих их пород.

Для расчета систем ЦКП используется ряд методов [4], основанных на физической и геометрической идеализации расчетных областей, что делает задачу абстрактной. В данной статье предлагается использовать для указанных целей метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий получать решения с достаточным для практических целей приближением.

Программы, реализующие процедуру МКЭ [I,2], имеют общие черты и различия, заключающиеся в специфичности решаемых задач, что определяет выбор типов конечных элементов, наличие дополнительных блоков в программах, позволяющих решать физически и геометрически нелинейные, стационарные и нестационарные задачи и т.д.

Для расчета напряженно-деформированного состояния систем ЦКП автором с использованием ряда процедур, описанных в работе [3] , была разработана программа "Целик" (рис. I).

Для упругих пород расчеты по программе «Целик", с учетом теплового фактора, производятся следующим образом:

I. С помощью процедуры GDATA вводятся исходные данные, которые состоят из геометрического описания системы, свойств входящих в нее материалов, граничных перемещений узлов нулевых или ненулевых, и значения температуры элементов.

2. Для вычисления перемещений, возникших вследствие температурного прогрева или охлаждения горных пород, прилегающих к камерам, используется процедура TERM. Предполагается, что температурная деформация в пределах элемента постоянна, а деформации сдвига отсутствуют. Тогда для случая плоской деформации можно записать

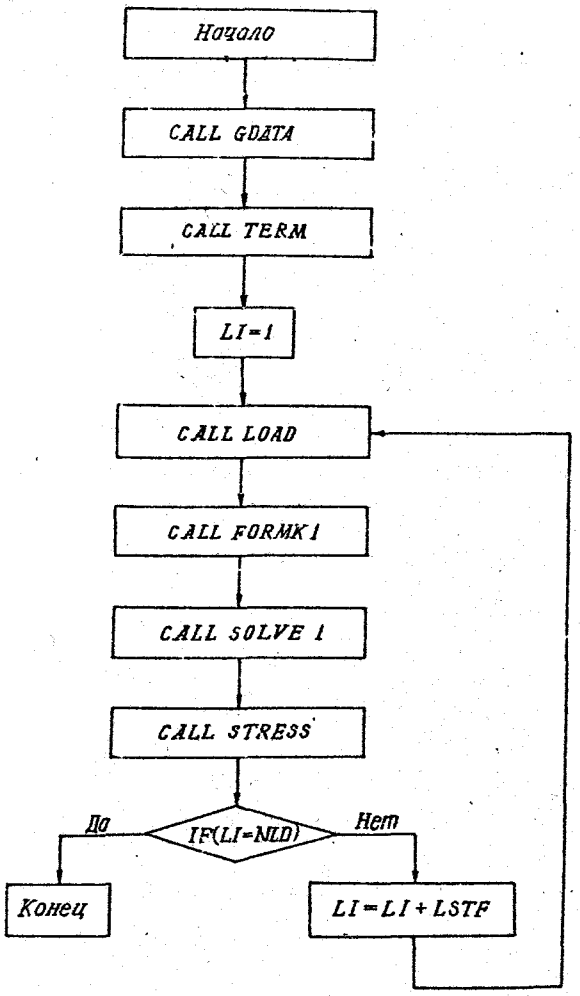



Рис.1. Блок-схема программы „Целик"

$$\{e_t\} = (1+\nu)\begin{Bmatrix} \alpha\theta \\ \alpha\theta \\ 0 \end{Bmatrix},$$

где $\nu$ – коэффициент Пуассона; $\alpha$ – коэффициент линейного расширения; $\theta$ разность температуры элементов системы и начальной температуры.

Перемещения вершин элемента, обусловленные температурным расширением,

$$\{u_t\} = [B]^{-1}\{e_t\},$$

а эквивалентные им узловые силы

$$\{F_t\} = [B]^T[D]\{e_t\}\nu,$$

где $[B]$ – матрица геометрии элемента; $[D]$ – матрица упругости.

Вычисленные значения вектора $\{F_t\}$ записываются в обобщенный вектор сил системы $\{F\}$.

3. Значения внешних нагрузок в узлах вводятся с помощью процедуры LOAD, и производится их запись в обобщенный вектор сил.

4. Формируется система линейных уравнений, выражающая зависимость между вектором сил $\{F\}$ и вектором перемещений $\{u\}$. Заданные перемещения учитываются путем модификации соответствующих элементов матрицы жесткости $[K]$ и вектора сил $\{F\}$. Процедура, выполняющая эти операции, получила название FORMK 1.

5. Система линейных уравнений решается методом Гаусса (процедура SOLVE I) и выводятся на печать значения вектора перемещений $\{u\}$, которые представляют собой сумму упругих и температурных перемещений.

6. Вычисляются и выводятся на печать значения компонентов тензора напряжений, главных напряжений и угла, определяющего отклонение от вертикали линии действия максимального напряжения, а также значения коэффициента запаса прочности для каждого элемента. Коэффициент запаса прочности определяется исходя из предположения, что горные породы разрушаются за

счет сдвига, а предельные состояния на площадках сдвига описываются законом Кулона. Тогда коэффициент запаса прочности элемента

$$K_{з.п} = \tau_{пр} / \tau_{max},$$

где $\tau_{пр}$ и $\tau_{max}$ - предельные и максимальные касательные напряжения в элементе.

Программа „Целик" составлена на языке ФОРТРАН-IУ и позволяет в рамках оперативной памяти системы ЕС 1022 решать задачи, содержащие 510 узлов и 950 элементов при максимальной разности номеров узлов 35.

Рассмотрим расчет системы ЦКП методом конечных элементов, включающий определение влияния тектонической трещины и действия канатов, стягивающих целик на величину перемещений контуров камер I и 2. Расчетная схема системы включает 429 элементов и 249 узлов (рис.2).

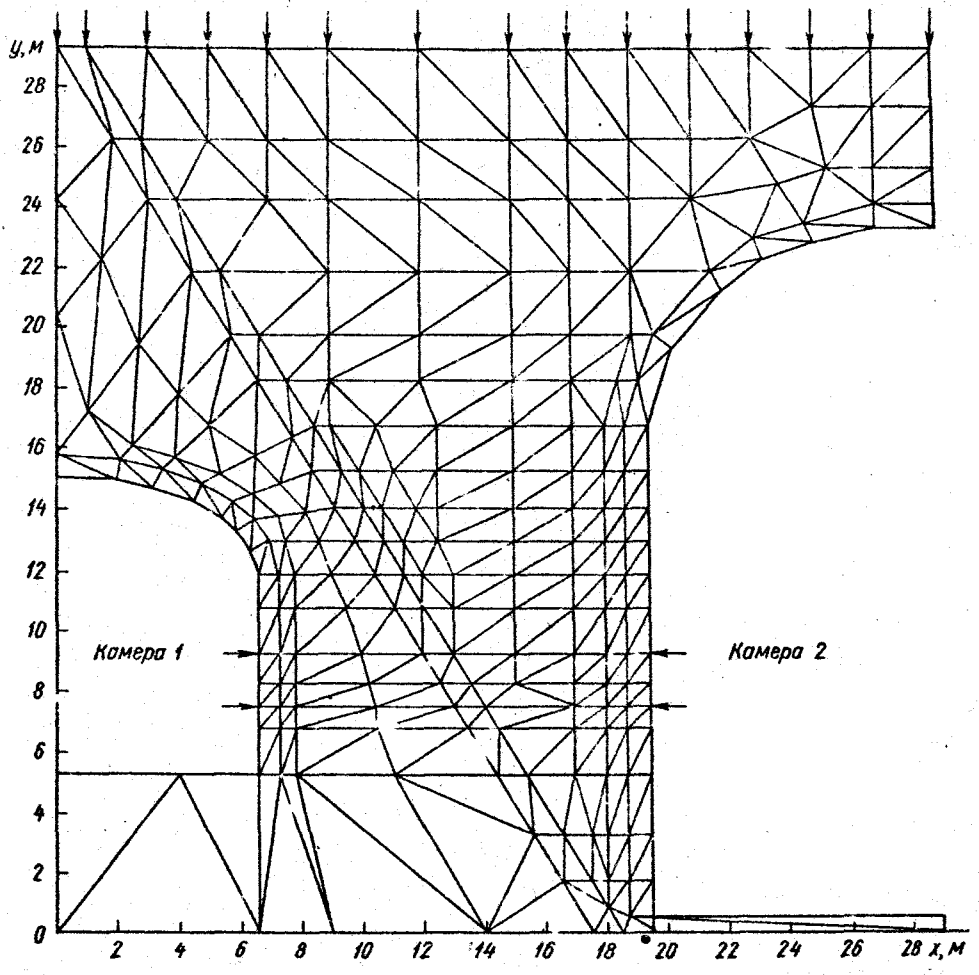



Рис.2. Расчетная схема системы ЦКП

Параметры системы, ширина первой камеры $b_1$ = 13 м, высота 0,7 $b_1$; второй камеры – $b_2$ = 1,7 $b_1$ и высота 1,5 $b_1$. Ширина целика между камерами 0,9 $b_1$. Толщина бетонной обделки в камерах 0,06 $b_1$; систему рассекает тектоническая трещина шириной 2 м, заполненная глиной и обломками породы.

Физические свойства пород и бетона следующие

| | Гнейс | Зона трещины | Бетон |
|---|---|---|---|
| $E$, Па | $6 \cdot 10^{10}$ | $1 \cdot 10^{8}$ | $2 \cdot 10^{10}$ |
| $\nu$ | 0,24 | 0,37 | 0,24 |
| $\gamma$, Н/м$^3$ | $2,7 \cdot 10^{7}$ | $2,3 \cdot 10^{7}$ | $2,3 \cdot 10^{7}$ |

Целик стянут канатами, действие которых заменено приложением в соответствующих узлах сил 40 кН на 1 см толщины модели. Действие вышележащей толщи пород заменено приложением сосредоточенных сил в узлах, находящихся на верхней границе системы из расчета 54,0 кН на 1 см толщины модели.

Результаты расчета показывают, что в системе без трещины и бетонной обделки (рис.3) разность высот и пролетов камер резко меняет симметрию в распределении перемещений на контурах камер 1 и 2. Бо́льшая высота камеры 2 и, следовательно, бо́льшая, в сравнении с камерой 1, способность к деформированию привели к тому, что значительная часть кровли и почти весь целик перемещаются в сторону камеры 2, при этом максимальные горизонтальные перемещения 0,75 мм получены в узлах 44 и 54. Максимальные вертикальные перемещения кровли камер 1 и 2 отмечены в узлах 185 (4,2 мм) и 246 (7,6 мм).

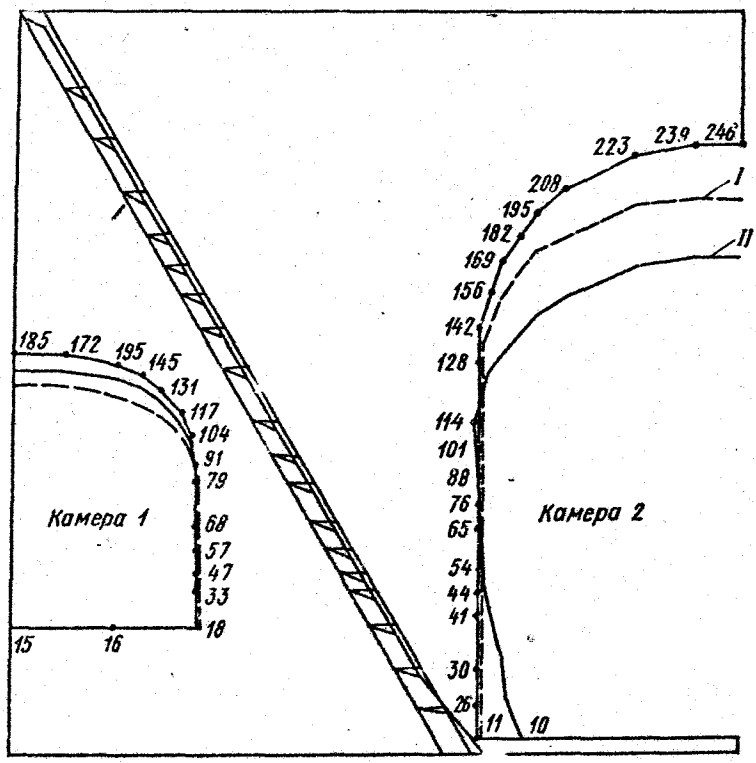



Рис.3. Результаты расчета системы ЦКП
I и II – линия перемещения контуров камер 1 и 2 в системе соответственно без бетонной обделки и зоны трещины и с бетонной обделкой и зоной трещины

Учет тектонической трещины и обделки показал, что в системе произошли значительные локальные изменения перемещений, заключающиеся в соскальзывании правой части системы по трещине, что увеличивает перемещения нижней части стенки камеры 2 от 0,5 до 6,8 мм. В левой части системы, под трещиной, образуется зона разгрузки, при этом вертикальные перемещения кровли камеры I в среднем уменьшаются от 4 до 2 мм. В области кровли камеры 2 образуется зона повышенной концентрации напряжений, и вертикальные перемещения кровли достигают в среднем I4 мм против 7,6 мм в предыдущем случае.

Результаты расчета системы с канатными стяжками целика показали, что влияние стяжек невелико и ограничивается участками, где расположены прижимные плиты. Так, горизонтальные перемещения стенки камеры 2 в узлах 65 и 44 уменьшились соответственно от 1,8 и 2,4 мм до 0,5 и I мм. Горизонтальные перемещения боковой стенки камеры I остаются практически без изменений.

Расчеты систем ЧКП показывают, что применение метода конечных элементов является весьма перспективным. Результаты расчетов как по характеру распределения перемещений, так и по их значениям достаточно точно совпадают с данными натурных замеров. Значительная трудоемкость подготовки исходной числовой информации может быть уменьшена путем составления специальных подпрограмм автоматической или полуавтоматической разбивки расчетных областей.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. М., Недра, 1975.

2. Ержанов Ж.С., Каримбаев Т.Д. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород. Алма-Ата, Недра, 1975.

3. Зинкевич О. Метод конечных элементов в технике. М., Мир, 1975.

4. Проскуряков Н.М., Пермяков Р.С., Черников А.К. Физико-механические свойства соляных пород. Л., Недра, 1973.