

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗОН ВОКРУГ ТОННЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПО ТЕОРИИ МОРА-КУЛОНА

**Миралимов М.Х., Каршибоев А.И.**

Ташкентский государственный транспортный университет

***Аннотация:** Исследование напряженно-деформированного состояния вокруг подземных горизонтальных выработок и, в связи с этим определение давления грунтов, действующего на конструкцию тоннеля, является одной из основных задач механики подземных сооружений. Сложность этой задачи объясняется разнообразием свойств горных пород, условий проведения тоннельных выработок и назначения их геометрии. В настоящей работе рассматривается методика и задача определения напряженно-деформированного состояния в окрестности тоннелей различного поперечного сечения с учетом упругопластических свойств деформирования грунтов по теории предельного состояния Мора-Кулона. Для расчета напряженно-деформированного состояния применяется метод конечных элементов в сочетании с методом начальных напряжений, причем используются изопараметрические конечные элементы с произвольной аппроксимацией.*

***Ключевые слова:** Тоннель, грунт, метод конечных элементов, предельная зона.*

## THE METHOD FOR DETERMINING LIMIT ZONES AROUND TUNNEL STRUCTURES ACCORDING TO THE MOHR- COULOMB THEORY

***Abstract:** The study of the stress-strain state around underground horizontal mine workings and, in connection with this, the determination of the soil pressure acting on the tunnel structure is one of the main tasks of the mechanics of underground structures. The complexity of this task is explained by the variety of rock properties, the conditions for the implementation of tunnel workings and their geometry. In this paper, we*

*consider the method and problem of determining the stress-strain state in the surroundings of tunnels of various cross sections, taking into account the elastic-plastic properties of soil deformation according to Mohr–Coulomb theory. To calculate the stress-strain state, the finite element method in combination with the initial stress method and isoparametric finite elements with arbitrary approximation are used.*

**Keywords:** *Tunnel, soil, finite element method, limit zone.*

## **Введение**

Сегодня в Республике Узбекистан предстоящие широкие масштабы транспортного строительства выдвигают в качестве одной из важнейших задач повышение качества сооружаемых объектов при одновременном снижении их материалоемкости, трудовых затрат и стоимости. Одним из направлений, способствующих решению этой задачи, является разработка и внедрение новых конструкций подземных сооружений, совершенствование методов расчета и проектирования транспортных тоннелей. При этом разработка на основе современных вычислительных методов расчетная модель должна обеспечить в первую очередь выполнение расчетов напряженно-деформированного состояния системы «тоннель-грунт», где описываются реальные свойства грунтов окружающих тоннель.

Осуществление программы подземного строительства в городах требует решения ряда сложных архитектурно-планировочных и строительных задач, разработки новых инженерных решений с учетом накопленного прогрессивного опыта. При этом, умение правильно определять внутренние усилия в обделках тоннелей, используя различные инженерные методы и сравнивая их между собой, принимать обоснованные инженерные решения являются актуальными вопросами.

## **Метод решения и расчетные исследования**

Обзор литературы и анализ работ посвященным расчету и проектированию транспортных тоннелей показал, что в задачах, связанными с расчётами подземных сооружений, необходимо постулировать начальное напряжённое состояние массива горных пород. Это начальное напряжённое состояние нарушается после

образования выработки тоннеля. Полные напряжения  $\sigma_{ij}$  в любой точке горной породы тогда можно представить как сумму начальных напряжений  $(\sigma_{ij})_0$  и изменений напряжений  $\sigma'_{ij}$  в этой точке, обусловленных проведением выработки

$$\sigma_{ij} = (\sigma_{ij})_0 + \sigma'_{ij} \quad (1)$$

Изменения напряжений  $\sigma'_{ij}$  называются дополнительными напряжениями.

Так, как выработки проводятся в предварительно напряженном массиве пород, то реалистическое воспроизведение ситуации должно бы учитывать поэтапные изменения в геометрии выработок. Вместо поэтапного изменения в геометрии выработки, будем моделировать образование выработки путём постепенного снижения граничных усилий от начального значения до нуля.

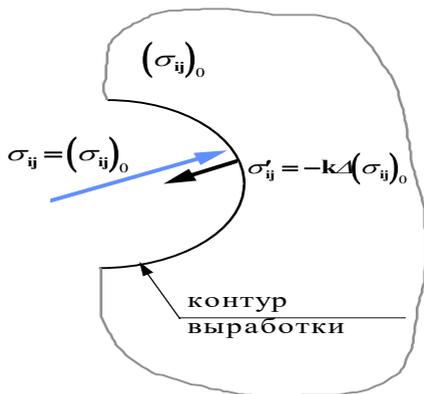


Рис 1. Моделирование образования выработки тоннеля

Прежде всего можно заметить, что напряжённое состояние вокруг выработки не изменится по сравнению с начальным состоянием, если на границе приложить усилия, эквивалентные тем, которые существовали до образования выработки.

Конечному напряженному состоянию соответствует свободная от усилий граница  $\sigma_{ij} = 0$ , чему отвечает дополнительные усилия  $\sigma'_{ij} = -(\sigma_{ij})_0$ . Для моделирования образования выработки

представим, что конечное состояние достигается в результате постепенного снижения усилий на границе, как изображено на рис. 1. Если начальные усилия разделить на  $K$  ступеней величиной

$\Delta(\sigma_{ij})_0 = \frac{(\sigma_{ij})_0}{K}$ , то дополнительные усилия для  $k$ -го шага

снижения нагрузок составляют

$$\sigma'_{ij} = -k\Delta(\sigma_{ij})_0 = -\frac{k \cdot (\sigma_{ij})_0}{K} \quad (2)$$

а полные усилия равны

$$\sigma_{ij} = (\sigma_{ij})_0 + \sigma'_{ij} = (\sigma_{ij})_0 \left(1 - \frac{k}{K}\right) \quad (3)$$

Следовательно, последний шаг  $k=K$  даёт, как и должно быть

$$\sigma'_{ij} = -(\sigma_{ij})_0, \quad \sigma_{ij} = 0.$$

Для реализации этого алгоритма была использована конечно-элементная модель и при этом на каждом шаге приращения дополнительных напряжений выбирались так, чтобы в пластическую зону переходил один конечный элемент [4].

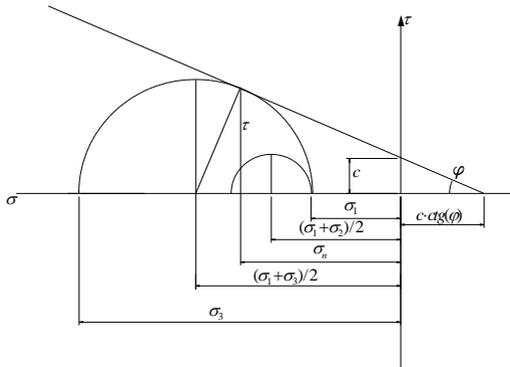


Рис.2. Графическое представление условия текучести Мора-Кулона

В качестве условия текучести для упругопластической задачи принять условие текучести Мора-Кулона (рис.2):

$$F = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi = 0 \quad (4)$$

Другими словами, сначала задавалось приращение нагрузки  $\Delta F$ , и на это приращение решалась задача и определялись напряжения  $\Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y, \Delta\tau_{xy}$ . Далее выполнялась процедура по определению необходимого приращения нагрузки, при которой в пластическую зону переходил один конечный элемент. Опишем подробнее эту процедуру.

Главные напряжения можно определить по известным формулам

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (5)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

подставляя (5) в (4) и проделав преобразования можно записать

$$\begin{aligned} & (\sigma_x^2 + \sigma_y^2) \cos^2 \phi - 2\sigma_x \sigma_y (1 + \sin^2 \phi) + 4\tau_{xy}^2 + \\ & \begin{pmatrix} \sigma_x + \\ \sigma_y \end{pmatrix} 2c \sin 2\phi = 4c^2 \cos^2 \phi \end{aligned} \quad (6)$$

Если в место  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  подставить  $\sigma_x + r\Delta\sigma_x, \sigma_y + r\Delta\sigma_y, \tau_{xy} + r\Delta\tau_{xy}$  и решить уравнение (6) относительно  $r$ , то для каждого элемента, находящегося в упругой зоне, можно определить свой коэффициент  $r$  на который надо умножить приращение нагрузки, чтобы этот конечный элемент достиг предела текучести. Элемент, у которого  $r$  минимально первым перейдет в пластическую область.

Следовательно, если все результаты вычисленные на данном шаге приращения нагрузки  $\Delta F$ , умножить на минимальный коэффициент  $r$ , то мы получим ситуацию при которой в пластику перейдет один элемент. Последовательно применяя на каждом шаге приращения нагрузки, эти вычисления достигается последовательный переход конечных элементов в пластическую область.

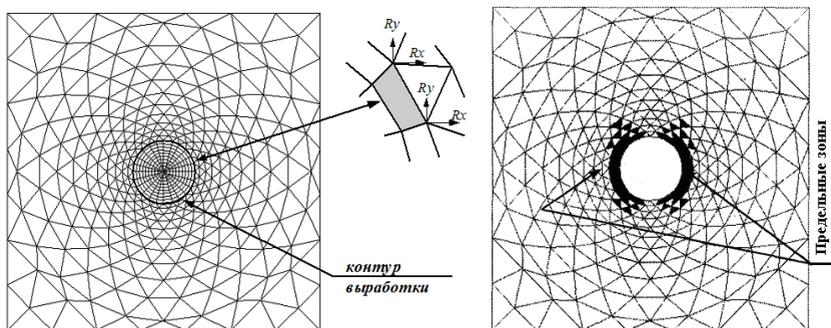
Для улучшения работоспособности предложенной методики расчета разработаны алгоритмы и программы разбивки на конечные элементы и нумерации элементов и узлов, вывод графической информации об исходных данных, о перемещениях в узлах и

напряжениях в элементах, а также алгоритм вывода информации в графическом виде.

В качестве примера решена упругопластическая задача со следующими характеристиками для грунта: Собственный вес  $\gamma=0,0198 \text{ МН/м}^3$ , модуль деформации  $E=11 \text{ МПа}$ , коэффициент Пуассона  $\nu=0,3$ , сцепление  $C=0,08 \text{ МПа}$ , угол внутреннего трения  $\varphi=26^\circ$ . Задача решалась следующим образом. На первом шаге были определены начальные напряжения по расчетной схеме представленной на рис.3, а. и граничные усилия по контуру будущей выработки. На втором шаге с целью проверки правильности определения граничных усилий, определялись напряжения в области вокруг выработки рис.3, б т.е. задавались граничные усилия и гравитационные силы.

Результат расчета должен совпасть с результатами на первом шаге. На третьем шаге решалась упругопластическая задача. Задача решалась методом описанным выше т.е. задавалось начальное напряжение и порциями прикладывались силы снижающие начальные напряжения по контуру выработки. Порции определялись так, чтобы в пластическую зону переходил один конечный элемент.

По необходимости можно получить значения напряжений вдоль контура выработки. Результаты показали, что предельные зоны неупругости распространяются от границы выработки во внутрь грунта, как показано на рис. 3, б.



а) приведение напряжений к силам отбрасываемой части массива,

б) предельные зоны

Рис. 3. Расчет выработки тоннеля

Теперь, исследуем напряженно-деформированное состояние обделки автотранспортного тоннеля, где поперечное сечение обделки и ее конструктивные размеры представлены на рис.4. Для расчета приняты следующие исходные данные: для грунта - объемный вес  $\gamma=0,0225 \text{ МН/м}^3$ , кажущийся угол внутреннего трения  $\varphi=37^\circ$ , сцепление  $S=2 \text{ МПа}$ , модуль деформации  $E=5 \cdot 10^2 \text{ МПа}$ , коэффициент Пуассона  $\nu=0,2$  и для обделки - объемный вес  $\gamma=0,025 \text{ МН/м}^3$ , модуль Юнга  $E_b=30 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ , коэффициент Пуассона  $\nu=0,32$ . Тоннель находится на глубине 40 метров, при этом временная крепь устанавливается из бетонного свода марки В25 с толщиной 0,7 м. Для снижения влияния граничных условий на напряженное состояние тоннелей, располагаем ее их достаточно расстоянии от границ (рис.5, а). На первом этапе определим начальное напряженное состояние массива.

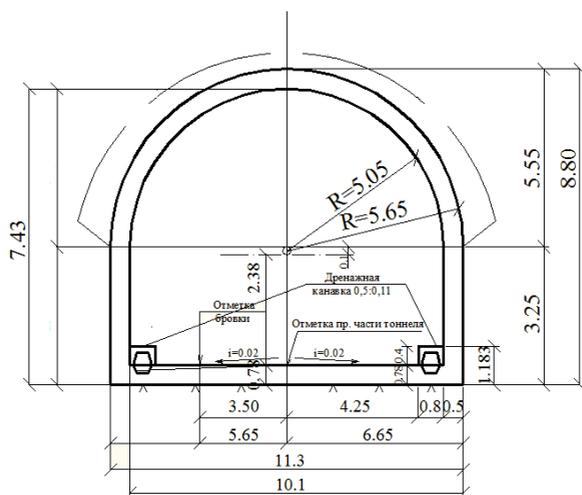
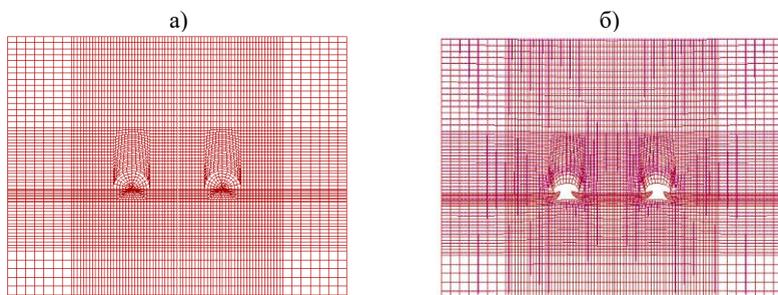


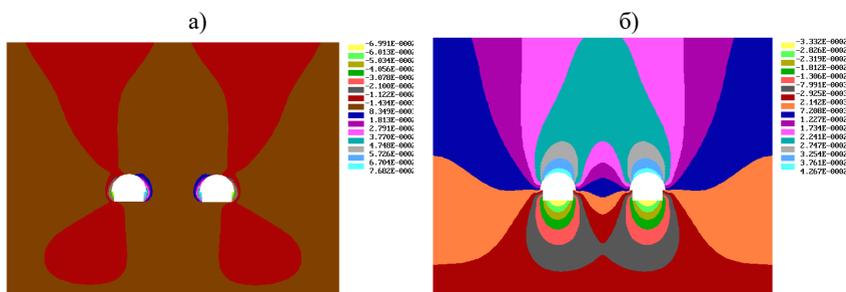
Рис. 4. Конструкция автотранспортного тоннеля глубокого заложения

Численное моделирование и исследование задачи проведем по разработанной программе. При расчетах считаем, что два тоннеля возводятся одновременно и далее рассматриваем картину распределения напряжений вокруг тоннелей.



а - схема моделирования области в плоскости, б - картина деформирования

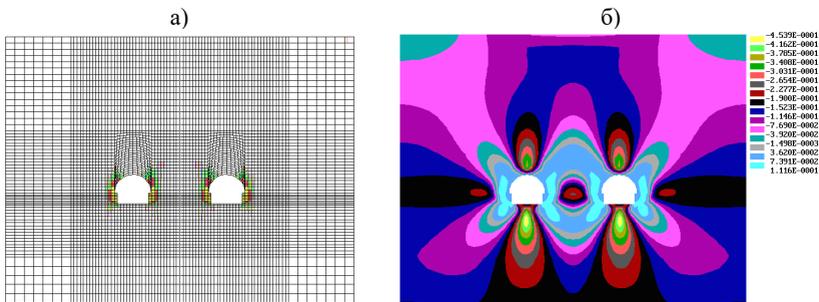
Рис.5. Область без крепления



а - горизонтальных, б – вертикальных

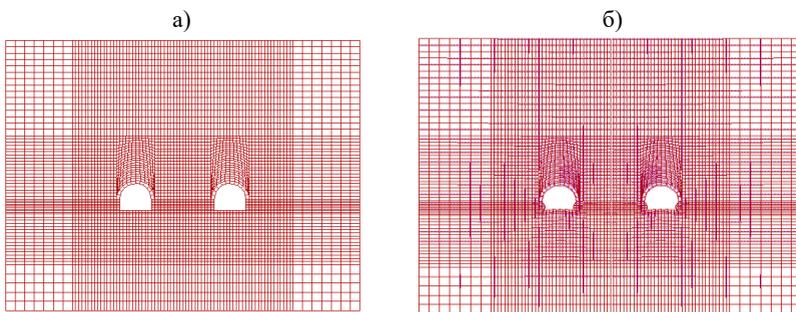
Рис. 6. Изохромы перемещений, (м)

Вариант 2 - пройден верхний уступ, установлена временная бетонная крепь, пройден нижний уступ. Из приведенных рисунков (рис.8, рис.9, рис.10), можно увидеть, что после возведения временного крепления предельные зоны в сводовой части не появились, но в нижней части они увеличились. В результате нелинейного расчета напряжения вокруг тоннеля уменьшились по сравнению с упругими на 15-18%. Как указывалось выше, в массиве переход от упругой в нелинейную упругопластическую зону осуществляется поэлементно и здесь можно увидеть характер протекания пластичности (критических зон) вокруг тоннелей. За сводовой части неупругая зона не осталась, но боковой части в пластическую зону перешли несколько элементов.



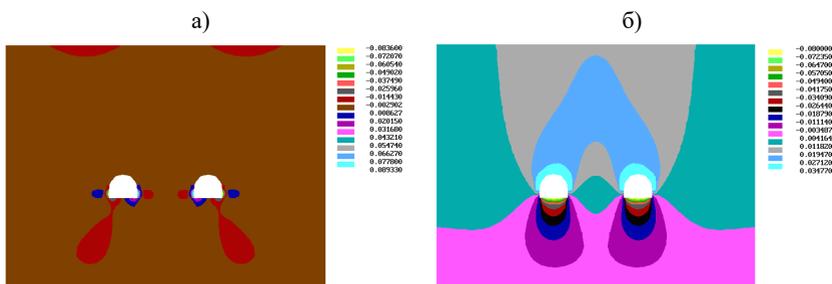
а - в конечном этапе, б - критические зоны по критерию Мора-Кулона

Рис.7. Места вокруг выработки, в которых порода разрушилась, без временного крепления



а - схема моделирования области в плоскости, б - картина деформирования

Рис.8. Область с верхним бетонным креплением выработки

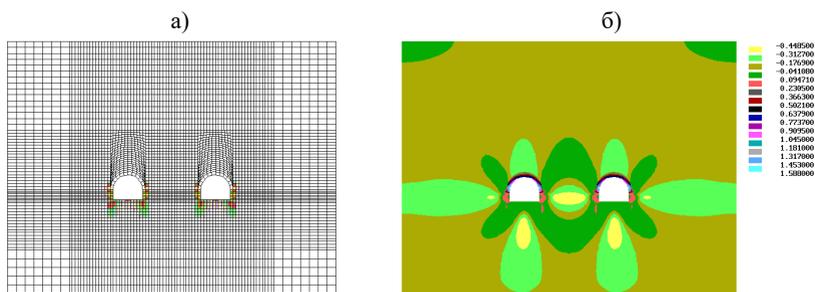


а - горизонтальных, б - вертикальных

Рис. 9. Изохромы перемещений в массиве с верхним бетонным креплением выработки, (м)

На основе проведенных исследований по определению нарушенных зон вокруг тоннелей были окончательно определены следующие глубины пластических слоев от поверхности выработки: над сводовой частью пластические зоны не появились (уже с креплением); у стенки максимальная глубина составляет 2 м; в лотковой части 2,5-3,0 м.

Самым опасным в данном случае с точки зрения устойчивости являются нижние боковые поверхности стен и края лотка выработки. Поэтому, исходя из опыта практики проектирования и строительства, в скальных грунтах рекомендуем применение различных мероприятий по укреплению стен выработок. По нашему мнению, применение анкерной крепи позволяет усиливать сцепление пород, повышает их прочность и устойчивость и не дает развиваться обрушению стенки. Длину анкеров принимаем 3-3,5 м. Шаг анкеров можно назначать 50 см, при этом толщины плит, устанавливаемых на стенку, принимаются 10-15 см (рис.11). Устойчивость краев и границ можно обеспечить другой временной крепью, как например, в виде досок - 1, поддержанных анкерами и швеллерами подхватками – 2.



а - в конечном этапе, б - критические зоны по критерию Мора-Кулона

Рис.10. Места вокруг выработки, в которых порода разрушилась, с временным креплением выработки

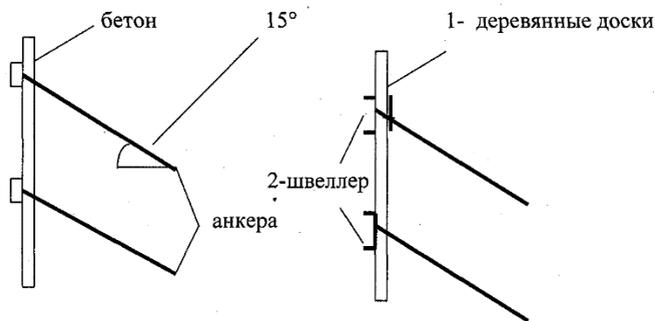


Рис. 11. Рекомендуемые типы крепления стен выработок тоннелей для скального грунта

### Заключение

Исследование напряженно-деформированного состояния вокруг подземных горизонтальных выработок и, в связи с этим определение давления грунтов, действующего на конструкцию тоннеля, является одной из основных задач механики подземных сооружений. Разработана методика расчета определения напряженно-деформированного состояния в окрестности тоннелей различного поперечного сечения с учетом упругопластических свойств деформирования грунтов по теории предельного состояния Мора-Кулона. Для расчета использован метод конечных элементов в сочетании с методом начальных напряжений, причем применены изопараметрические конечные элементы с произвольной аппроксимацией.

Для улучшения работоспособности предложенной методики расчета разработаны алгоритмы и программы разбивки на конечные элементы и нумерации элементов и узлов, вывод графической информации об исходных данных, о перемещениях в узлах и напряжениях в элементах, а также алгоритм вывода информации в графическом виде

Решены две задачи о распределении напряжений вокруг выработок транспортных тоннелей круглых и подковообразных очертаний и даны рекомендации по укреплению стен выработок в возможных зонах пластичности.