УДК 622.831.312

П.А.ДЕМЕНКОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБДЕЛОК ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ В ЗОНЕ ИХ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ

Осуществлено численное моделирование методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния обделок перегонных тоннелей метрополитена в зоне их взаимного влияния. Тоннели не параллельны друг другу, имеют разную глубину заложения и проходились в разное время. Для моделирования было выбрано два опытных участка, соответствующих участкам, на которых производились натурные наблюдения. Использование метода конечных элементов позволило решить задачу в объемной постановке и учесть сложную конфигурацию тюбингов, слоистость массива и этапы возведения тоннелей.

In work was realized numerical simulation by the finite-element method of tense-deformed condition lining running tunnel underground railroad in the area of their cross-feed. Tunnels are not parallel to each other, have different depth of a pawning and were passed at a different time. Two experienced areas were choosing for modeling, corresponding areas, to which were produced natures observing. Finite-element method has allowed deciding a problem in three-dimensional production and taking a complex configuration of liner plate into account, cleavage solid and stages carry-conduct of tunnels.

Применение метода конечных элементов (МКЭ) позволяет значительно приблизить расчетную схему к реальному объекту, дает возможность учесть наиболее важные свойства среды, а также реальную геометрию сооружения. Использование МКЭ наиболее эффективно в тех случаях, для которых не имеется точных аналитических решений: для расчета конструкций сложной конфигурации; расчета обделок, расположенных в неоднородном грунтовом массиве; учета постадийности возведения обделки.

В работе рассматривались три тоннеля глубокого заложения (станция «Спортивная»), расположенные на разных глубинах и имеющие разные направления в пространстве и время проведения.

Для моделирования тоннелей использовались объемные четырехузловые элементы Tetra4. Количество элементов в первой модели колебалось от 162533 до 184891 в зависимости от количества пройденных тоннелей. Количество элементов во второй модели достигало 235688. Диаметр тоннеля 5,5 м. Ширина массива 61,1 м. Толщина массива 11,43 м (15 тюбингов).

Для моделирования были выбраны два опытных участка, соответствующих участкам, на которых производились натурные наблюдения.

Расчетная схема задачи представлена на рис.1. Рассматриваемый бесконечный объем грунтового массива заменен конечным числом объемных четырехузловых элементов. Для узлов, расположенных по правой и левой границам массива, заданы запреты перемещения массива вдоль оси $U_x = 0$; по нижней границе $U_x = U_y = U_z = 0$; для граничных узлов, расположенных по плоскости *Y-X*, $U_z = 0$. Нагрузка на обделку тоннелей создавалась собственным весом вышележащих пород.

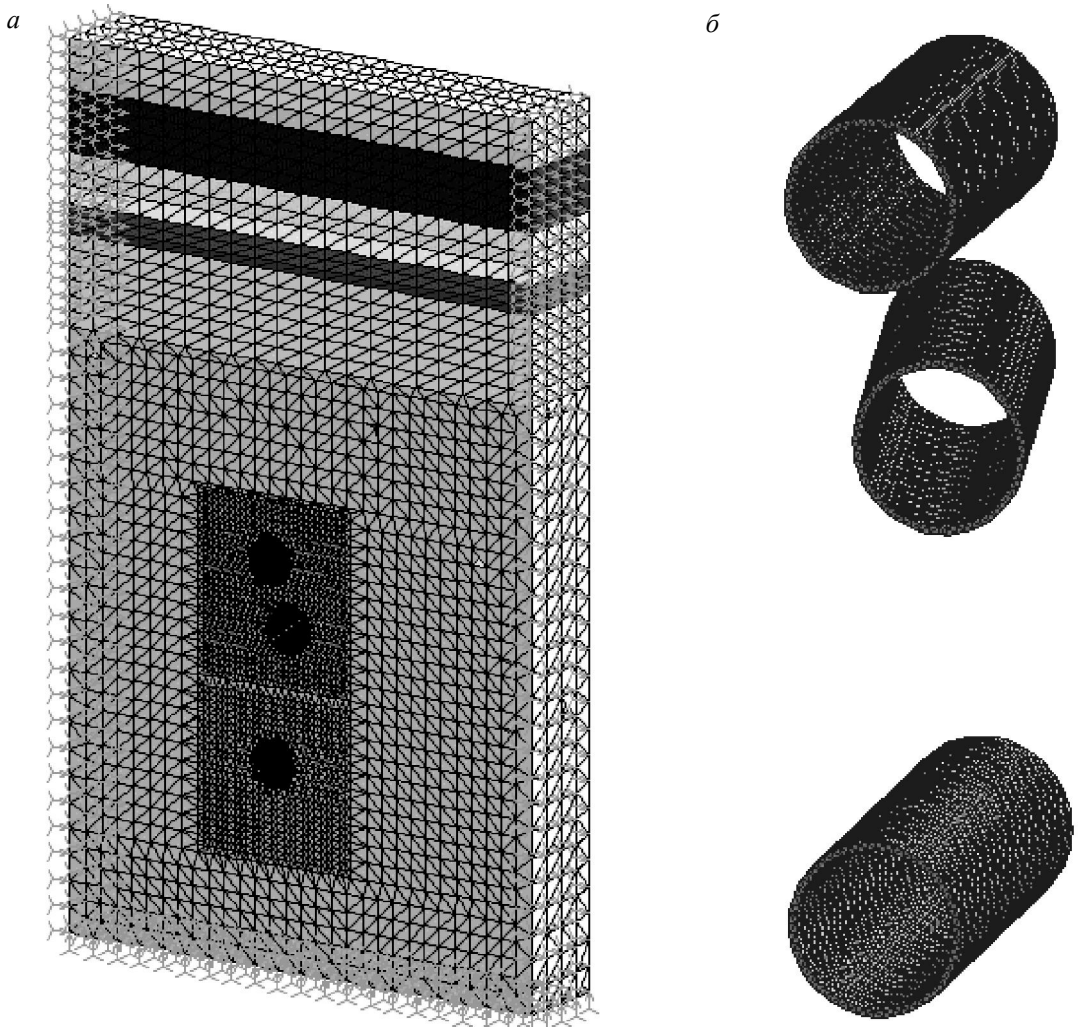


Рис.1. Конечно-элементная модель: *а* – расчетная схема слоистого массива и тоннелей; *б* – пространственное расположение тоннелей на первом опытном участке

С целью повышения точности расчета сетка конечных элементов разбита неравномерно – она сгущается в пределах станции и прилегающего к ней грунтового массива (рис.1, *а*). На периферии сетка представлена более крупными элементами.

Глубина заложения тоннеля I-II-III на первом опытном участке от шелыги свода до поверхности земли составляет 51 м. Тоннели не параллельны друг другу (рис.1, *б*).

Тоннель I-К-I был пройден спустя 5 лет после проходки тоннеля I-II-III. Поэтому на первом этапе была создана модель с двумя тоннелями II-II-III и I-II-III.

На втором этапе (три тоннеля) была осуществлена надработка тоннеля I-II-III тоннелем I-К-I.

Картины распределения тангенциальных напряжений в массиве и обделке тоннеля показаны на рис.2 и 3.

Наибольшие тангенциальные напряжения возникают на внутренних поверхностях спинок и ребер тюбингов.

При проходке третьего, верхнего тоннеля I-К-I напряжения в боках тоннеля незначительно снижаются (на 3 %), а в верхнем и нижнем сводах, наоборот, увеличиваются – происходит их перераспределение.

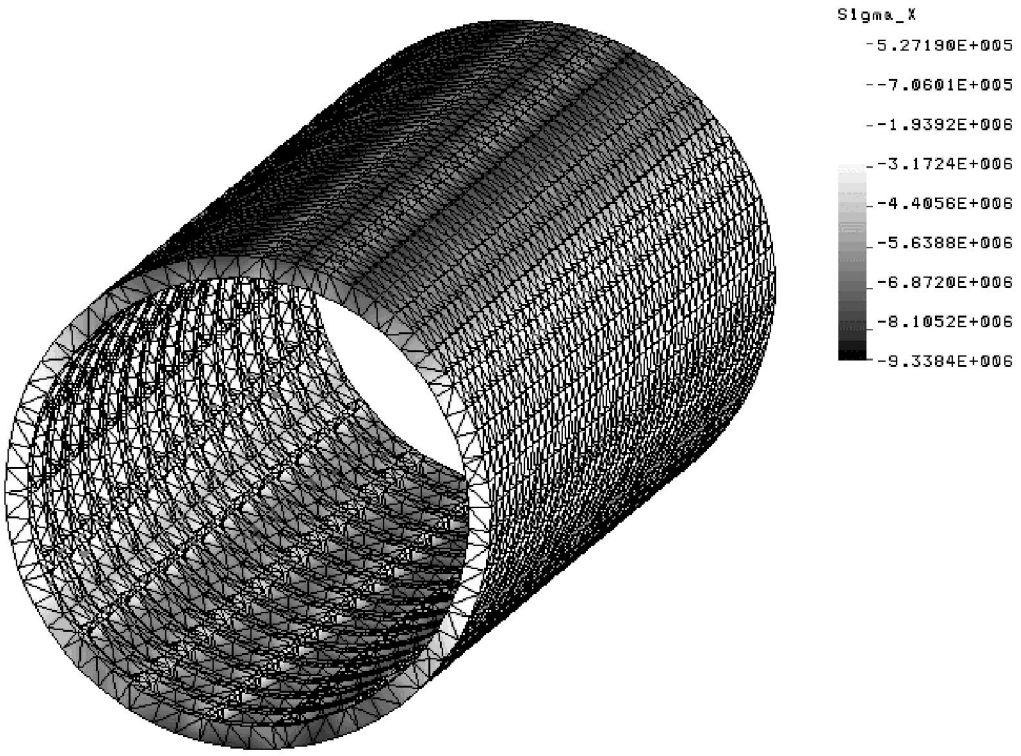


Рис.2. Картина распределения горизонтальных напряжений σ_x в обделке тоннеля I-II-III

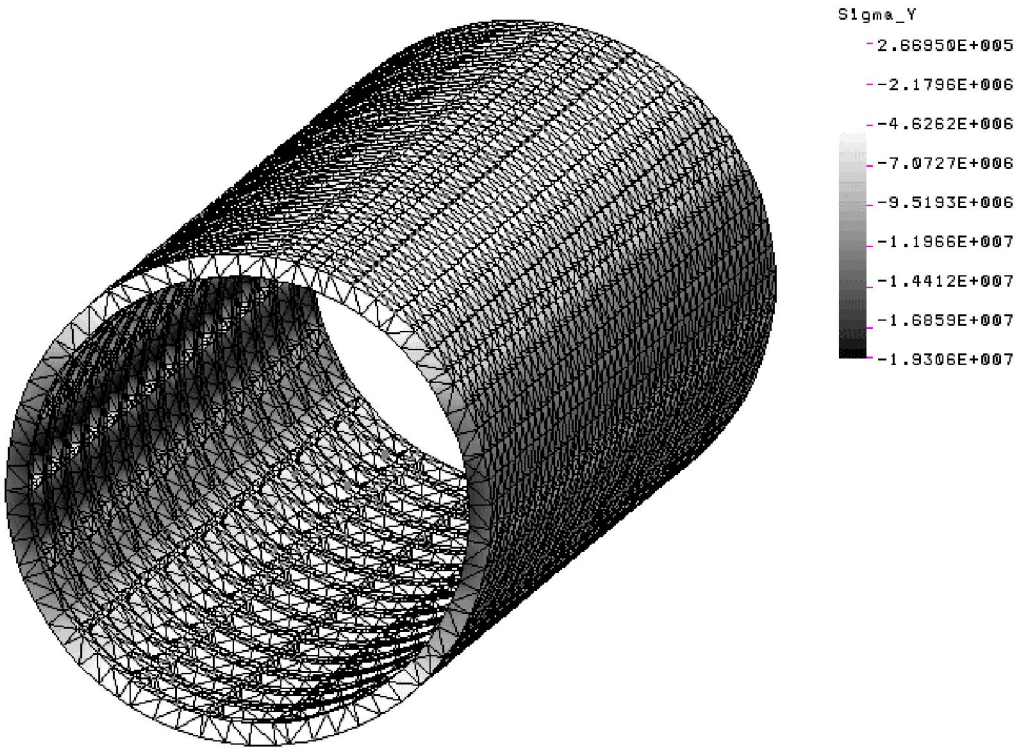


Рис.3. Картина распределения вертикальных напряжений σ_y в массиве и обделке тоннеля I-II-III

Глубина заложения тоннеля I-II-III на втором опытном участке от шелыги свода до поверхности земли составляет 51,4 м. Тоннели, также как и на первом опытном участке, не параллельны друг другу. В отличие от первого опытного участка исследуемый тоннель I-II-III располагается выше остальных тоннелей.

Результаты расчетов на первом и втором этапах и на момент сооружения всех трех тоннелей приведены в таблице.

Тангенциальные напряжения в боках тоннеля, МПа

Место измерения	Бок	Шелыга свода	Обратный свод
Спинка			
Внутри	17,5; 16,9; 16,7	8,2; 8,3; 8,0	8,8; 8,8; 8,4
Снаружи	11,3; 11,5; 15,5	5,1; 6,2; 6,3	4,9; 4,9; 8,1
Ребро			
Внутреннее	17,8; 17,2; 16,5	6,2; 6,8; 6,3	6,7; 6,7; 6,5
Наружное	9,8; 9,4; 14,4	5,1; 4,9; 7,5	4,9; 4,9; 7,9

Примечание. В каждой строчке результаты расчетов на первом этапе – первые цифры; на втором этапе – вторые цифры; на момент сооружения всех трех тоннелей – третьи цифры.

В боках тоннеля наибольшая концентрация тангенциальных напряжений наблюдается на внутренних гранях спинки и ребер тюбингов. В обратном своде максимальные напряжения возникают в спинке тюбинга на внешней и внутренней ее гранях, а также на наружной грани ребер тюбингов. Подобная картина наблюдается и в шелыге свода.

Тангенциальные напряжения в боках тоннеля больше, чем в верхнем и обратном сводах почти в два раза. Это можно объяснить тем, что боковые тюбинги в данном случае выступают в роли вертикальных опор и воспринимают основную часть нагрузки.

На внутренних поверхностях продольных полок горизонтального и вертикального диаметра возникают небольшие растягивающие напряжения, не превышающие 1 МПа. Однако в других горно-геологических условиях с увеличением нагрузок, при превышении предела прочности бетона на растяжение может происходить образование трещин.

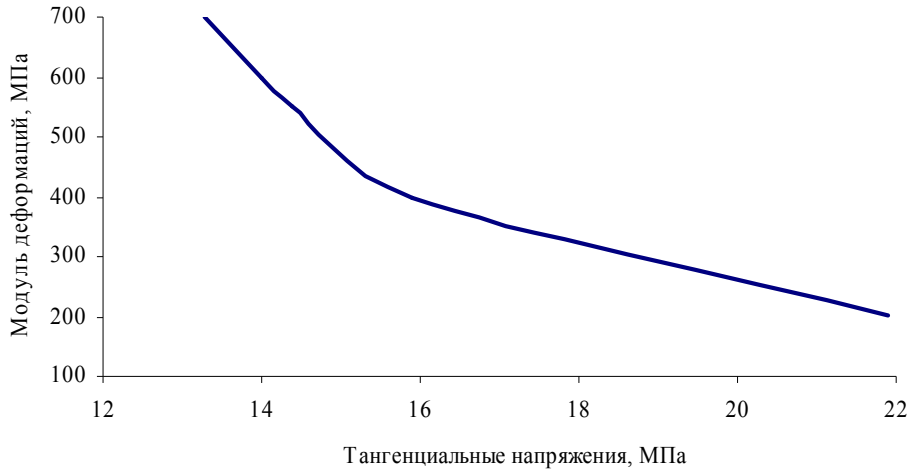


Рис.4. График зависимости напряжений в боках тоннеля от модуля деформации вмещающего массива

По первому опытному участку были проведены расчеты с различными модулями деформации вмещающего массива (E = 200-700 МПа). График зависимости тангенциальных напряжений в боках тоннеля от модуля деформации вмещающего массива представлен на рис.4. С увеличением модуля деформации происходит увеличение несущей способности вмещающего массива и вследствие этого снижение напряжений в обделке тоннеля.

Сравнение результатов численного моделирования методом конечных элементов с натурными исследованиями показывает их достаточно хорошую сходимость. Сравнивались тангенциальные напряжения в боках тоннеля: по натурным замерам первого опытного участка – 13 МПа, по расчетам – 13,3 МПа (на 2,3 % больше); по натурным замерам первого опытного участка – 15 МПа, по расчетам – 16 МПа (на 6 % больше).

Наибольшая концентрация тангенциальных напряжений наблюдается в боках тоннеля на внутренних поверхностях спинок и ребер тюбингов. На внутренних поверхностях продольных ребер горизонтального и вертикального диаметра возникают растягивающие напряжения, не превышающие 1 МПа. График зависимости тангенциальных напряжений в боках обделки тоннеля от модуля деформации вмещающего массива носит нелинейный характер.