

УДК 624.131.526

Косицын Сергей Борисович, д-р техн. наук, проф.,
РУТ (МИИТ), Россия, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, kositsyn-s@yandex.ru
Акулич Владимир Юрьевич, аспирант,
РУТ (МИИТ), Россия, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, 79859670635@yandex.ru

ЧИСЛЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСАДОК ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, СВЯЗАННЫХ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТОННЕЛЕПРОХОДСКОГО КОМПЛЕКСА НА ГРУНТОВЫЙ МАССИВ

Аннотация. Работа направлена на геотехнический прогноз влияния строительства перегонного тоннеля на изменение напряженно-деформированного состояния окружающего грунтового массива, а именно на возникающие при этом осадки на поверхности земли. Работа выполнена как численным, так и аналитическим методами. В результате выполненной работы авторами разработана методика, позволяющая определять осадки земной поверхности в процессе продвижения тоннелепроходческого механизированного комплекса методом конечных элементов благодаря использованию контактных элементов. Для анализа полученного результата произведен расчет осадки земной поверхности при продвижении тоннелепроходческого механизированного комплекса по аналитической методике. Результаты расчетов, произведенных численным и аналитическим методами, хорошо согласуются как качественно, так и количественно, что говорит о достоверности построенных расчетных моделей и вычислений.

Ключевые слова: тоннель, грунтовый массив, геотехника, тоннелепроходческий механизированный комплекс, мульда оседания, плоские и контактные конечные элементы.

Kosytsyn Sergey B., Dr. Sc., professor,
RUT (MIIT), 9, building 9, Obraztsov street, Moscow, 127994, Russia, kositsyn-s@yandex.ru
Akulich Vladimir Y., graduate student,
RUT (MIIT), 9, building 9, Obraztsov street, Moscow, 127994, Russia, 79859670635@yandex.ru

NUMERICAL METHOD OF DETERMINING THE EARTH SURFACE SUBSIDENCE RELATED TO THE IMPACT OF TUNNEL COMPLEX FOR SOIL

Abstract. The work is aimed at geotechnical prediction of the effects of construction of tunnel on the variation of stress-strain state of the soil massif, namely, the resulting

subsidence of the ground surface. The work is performed both by numerical and analytical methods. As a result of this work, the authors developed a technique that allows to determine the settling of the earth's surface in the process of moving the tunnel-passage mechanized complex by the finite element method through the use of contact elements. For analysis of the received results the calculation of the subsidence of the earth's surface while advancing the tunnel boring mechanized complex for analytical methods. The calculation results obtained by numerical and analytical methods agree well with each other both qualitatively and quantitatively, which indicates the reliability of the calculated models and calculations.

Key words: tunnel, soil massif, geotechnics, slurry shield, sedimentation mold, shell and spatial finite elements, contact finite elements.

Введение

Целью настоящей работы является геотехнический прогноз влияния строительства перегонного тоннеля на изменение напряженно-деформированного состояния окружающего грунтового массива, а именно на возникающие при этом осадки на поверхности земли.

В процессе ведения работ тоннелепроходческим механизированным комплексом (щитовой проходкой) на участке тоннеля, который не закреплен или частично закреплен, происходит смещение породы в сторону тоннеля. Таким образом, количество породы, которое вынимается из подземного пространства, всегда больше, чем теоретическое, посчитанное из проектного профиля тоннеля. Дополнительный объем породы, извлеченный из подземного пространства, носит название «потерянный объем» и определяется через параметр V_L , который является отношением между объемами извлеченной породы и самого тоннеля (определенному по внешнему диаметру тоннеля).

Потерянный объем является мерой нарушения массива проходческими работами и вызывает развитие мульды оседания земной поверхности.

Определение осадки земной поверхности в процессе ведения работ тоннелепроходческим механизированным комплексом численным методом в плоской постановке

Для решения поставленной задачи необходимо составить такую расчетную модель тоннеля с окружающим его грунтовым массивом, которая позволяла бы учитывать объем дополнительного потерянного грунта, извлеченного из подземного пространства в процессе ведения работ тоннелепроходческим механизированным комплексом, с последующим анализом полученного напряженно-деформированного состояния системы и сравнением результатов с аналитическим методом определения осадок.

Моделирование и расчеты произведены в современном конечно-элементном программном комплексе MSC PATRAN-NASTRAN в геометрически и физически нелинейной постановках задачи.

В основу расчетного комплекса MSC PATRAN- NASTRAN положен метод конечных элементов, позволяющий выполнять математическое моделирование процессов, протекающих в грунте. Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния представляются как в табличном, так и в графическом виде.

При решении задач методом конечных элементов массив считается сплошным. Условие сплошности удовлетворяется тем, что элементы в процессе деформирования области не теряют контакта друг с другом. Деформирование элемента обусловлено приложением со стороны соседних элементов или внешних воздействий узловых сил, каждая из которых раскладывается на две составляющие вдоль координатных осей. В итоге получается уравнение в матричной форме, связывающее известные внешние силы с неизвестными перемещениями узлов через матрицу жесткости элемента. После определения узловых перемещений в соответствии с известными соотношениями теории упругости находятся деформации и напряжения внутри элементов [1].

Проведены расчеты осадок земной поверхности в плоской постановке задачи. В таблице представлены основные физико-механические свойства грунтов.

Тоннель запроектирован в монолитном железобетоне из бетона В45 и арматуры А240, А400.

Геометрические характеристики кольца обделки перегонного тоннеля:

- наружный диаметр, мм – 5800;
- внутренний диаметр, мм – 5300;
- средняя длина кольца обделки вдоль тоннеля, мм – 1400;
- толщина блока, мм – 250;
- величина расстояния между грунтом и наружной поверхностью обделки, мм – 50.

Таблица

Физико-механические характеристики грунтов

№	Описание грунтов	Модуль деформации E , МПа	Коэффициент Пуассона ν	Плотность, кг/м^3
1	Насыпной грунт	13	–	1920
2	Суглинки пылеватые	22	0,37	2080
3	Суглинки песчанистые	27	0,35	2160
4	Суглинки песчанистые	27	0,35	2120
5	Пески пылеватые	30	0,31	2000
6	Пески мелкие	33	0,3	2010

Сначала для выполнения расчета по геотехническому прогнозу изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива при строительстве перегонного тоннеля с применением тоннелепроходческого механизированного комплекса в расчетном комплексе MSC PATRAN-NASTRAN необходимо создать геометрическую схему расчетной модели.

Геометрическая схема расчетной модели разработана на основании исходных данных по конструктивным решениям проектируемого объекта и данных инженерно-геологических изысканий.

Для расчета из рассматриваемого участка выделена полоса шириной 1,4 м (равная ширине кольца обделки строящегося тоннеля).

Рассмотренная часть тоннеля смоделирована прямыми балочными конечными элементами с шестью степенями свободы в каждом узле.

Области грунта аппроксимированы четырехузловыми плоскими конечными элементами также с шестью степенями свободы в каждом узле.

Для моделирования контакта между внешней стенкой обделки тоннеля и окружающим грунтом использовались контактные элементы, позволяющие задавать начальный зазор (в комплексе NASTRAN их называют GAP-элементами), что позволило учесть изъятие дополнительного объема грунта, образующегося при продвижении тоннелепроходческого механизированного комплекса благодаря созданию зазора между внешней стенкой обделки тоннеля и окружающим грунтом [2, 3, 4]. Эти элементы имели ненулевые длины и стремящиеся к нулю жесткости при растяжении [5, 6]. Их жесткости при сжатии стремились к бесконечности. Величина начального зазора принята равной 50 мм.

Расчетная область закреплена от перемещений, нормальных к поверхностям массива, по торцам, с боков и снизу. Оболочка по торцам имеет аналогичные опорные закрепления, обеспечивающие геометрическую неизменяемость расчетной модели.

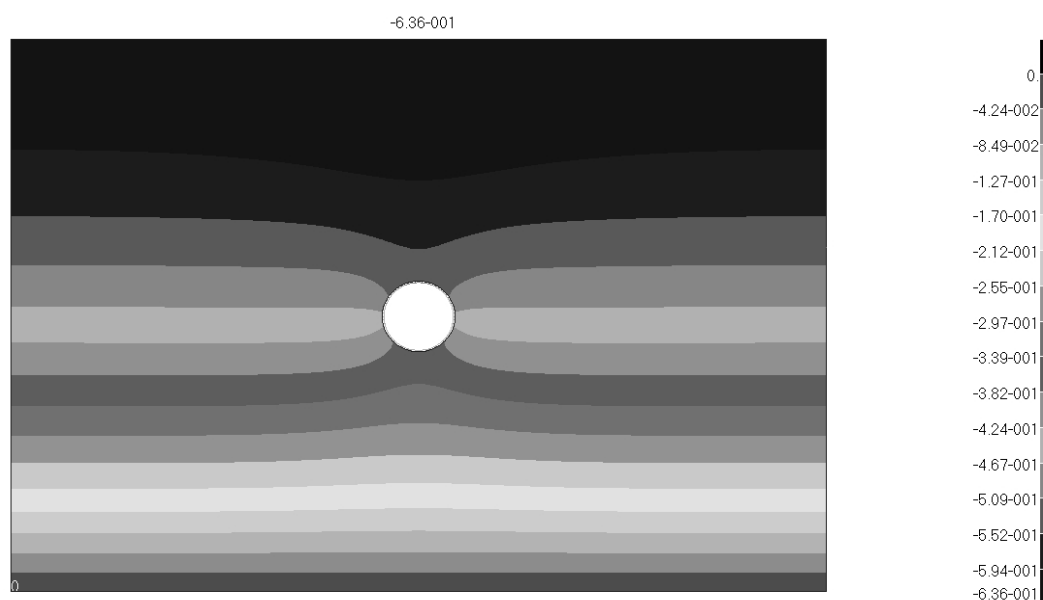
Расчет произведен в нелинейной постановке (контактные усилия определены методом последовательных приближений) и разбит на два этапа. На первом этапе определено начальное напряженно-деформированное состояние грунта от его собственного веса (бытовое состояние); на втором этапе определено конечное напряженно-деформированное состояние грунта после возведения тоннеля

с нагрузками от собственного веса грунта и веса тоннельной обделки.

На рис. 1 и 2 представлены поля вертикальных перемещений в грунтовом массиве в результате первого и второго этапа расчета соответственно.



*Рис. 1. Поля вертикальных перемещений грунтового массива
по результатам первого этапа расчета*



*Рис. 2. Поля вертикальных перемещений грунтового массива
по результатам второго этапа расчета*

Максимальная осадка над осью тоннеля после проходки составила 13,0 мм (получена как разность осадок конечного и бытового состояний).

Следует отметить, что при отказе от использования контактных элементов типа GAP, которые позволяют учитывать изъятие дополнительного объема грунта (создают зазор), образующегося при продвижении тоннелепроходческого механизированного комплекса, расчётная модель ведёт себя не вполне корректно и даёт несоответствующее действительности поле вертикальных перемещений грунтового массива (поверхность грунта поднимается, а не просаживается) [7, 8].

Аналитический метод определения осадок земной поверхности за счет «потери объема» грунта

Для сравнительного анализа полученного результата произведен расчет осадки земной поверхности при продвижении тоннелепроходческого механизированного комплекса по аналитической методике [9, 10].

Диаметр оси оболочки тоннельной обделки: $D = 5,8 \text{ м} = 5800 \text{ мм}$.

Глубина заложения оси тоннеля $z_0 = 22,7 \text{ м} = 22700 \text{ мм}$.

Параметр $i_x = 11350 \text{ мм}$.

Объем мульды осадки на единицу длины тоннеля:

$$V_s = \int_{-\infty}^{\infty} S_v dx = \sqrt{2\pi} i_x S_{v,\max} = \sqrt{2 \cdot 3,14} \cdot 11350 \cdot S_{v,\max} =$$
$$= 28443 \cdot S_{v,\max} \text{ (мм}^2\text{)}.$$
(1)

Объем «потерянного грунта» на единицу длины тоннеля принимается в размере 0,015 (1,5%) объема тоннеля $V_L = 0,015$.

Объем «потерянного грунта» на единицу длины тоннеля:

$$V_{sp} = V_L \cdot \frac{\pi D^2}{4} = 0,015 \cdot \frac{3,14 \cdot 5800^2}{4} = 396111 \text{ (мм}^2\text{)}.$$
(2)

Приравнивая объем мульды осадки объему «потерянного грунта»:

$$28443 \cdot S_{v,\max} = 396111,$$
(3)

получим максимальный размер осадки поверхности:

$$S_{v,\max} = \frac{396111}{28443} = 13,9 \text{ (мм)}. \quad (4)$$

В результате аналитического расчета максимальная осадка поверхности земли над осью тоннеля составила:

$$S_{v,\max} = 13,9 \text{ (мм)}. \quad (5)$$

Расхождение составляет 6,4% от значения осадки, полученного в MSC PATRAN-NASTRAN. Это говорит о хорошей сходимости результатов численного и аналитического расчетов и о корректной работе построенной конечноэлементной модели.

Применение предложенного метода определения осадки земной поверхности при строительстве Калининско-Солнцевской линии московского метрополитена

Предложенный метод нашел применение при определении осадок земной поверхности, расположенной в пределах зоны влияния строительства перегонных тоннелей Калининско-Солнцевской линии московского метрополитена.

Геометрическая схема плоской расчетной модели для решения поставленной задачи разработана на основании исходных данных по конструктивным решениям проектируемого объекта и данных инженерно-геологических изысканий.

Расчеты произведены в конструктивно нелинейной постановке (контактные усилия определены методом последовательных приближений) и разбиты на два этапа. На первом этапе определено начальное напряженно-деформированное состояние грунта от его собственного веса (бытовое состояние); на втором этапе определено конечное напряженно-деформированное состояние грунта после возведения тоннеля с нагрузками от собственного веса грунта и веса тоннельной обделки.

На рис. 3 представлено поле вертикальных перемещений в грунтовом массиве в результате второго этапа расчета для плоской расчетной модели.

Максимальная осадка над осью тоннеля после проходки составила 23,0 мм.

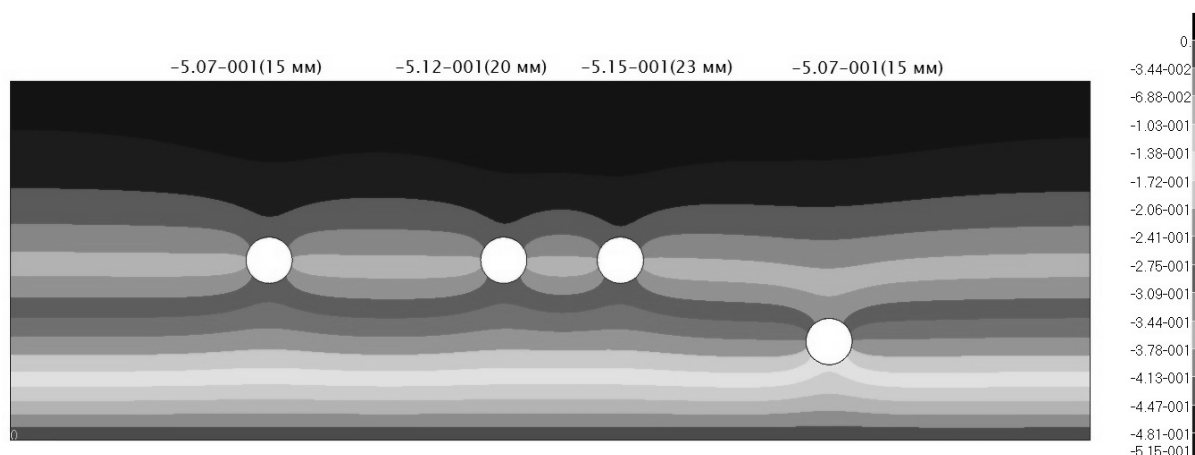


Рис. 3. Поля вертикальных перемещений грунтового массива по результатам второго этапа расчета для Калининско-Солнцевской линии метрополитена

Выводы

Авторами разработана методика, позволяющая определять осадки земной поверхности в процессе продвижения тоннелепроходческого механизированного комплекса методом конечных элементов благодаря использованию контактных элементов GAP. С целью проверки разработанной методики произведен расчет осадки земной поверхности при продвижении тоннелепроходческого механизированного комплекса аналитическим методом. Результаты расчетов, полученных численным и аналитическим методами, хорошо согласуются друг с другом как качественно, так и количественно, что говорит о достоверности построенной модели. Работоспособность предложенного метода проверена на примере расчета четырех перегонных тоннелей линии московского метрополитена.

Список литературы

1. Александров, А.В. Основы теории упругости и пластичности: учебник для строит. специальностей вузов / А.В. Александров, В.Д. Потапов. – М.: Высшая школа, 1990. – 400 с.
2. Габбасов, Р.Ф. К расчету гибких труб на совместное действие внешней нагрузки и внутреннего давления с учетом отпора грунта / Р.Ф. Габбасов // Гидротехническое строительство. – 1970. – № 10. – С. 17–19.
3. Клейн, Г.К. Расчет подземных трубопроводов / Г.К. Клейн. – М.: Стройиздат, 1969. – 240 с.
4. Косицын, С.Б. Расчет стержневых систем, взаимодействующих с упругим основанием, методом конечных элементов с использованием программного комплекса *MSC/NASTRAN FOR WINDOWS*: учеб. пособие / С.Б.Косицын, Д.Б. Долотказин; МИИТ. – М., 2004. – 116 с.
5. Леонтьев, Н.Н. Практический метод расчета тонкостенной цилиндрической трубы на упругом основании / Н.Н. Леонтьев // Тр. МИСИ. – 1957. – Изд. 27. – С. 47–69.
6. Прево, Р. Расчет на прочность трубопроводов заложенных в грунт / Р. Прево. – М.: Стройиздат, 1964. – 123 с.
7. Шагивалеев, К.Ф. Расчет замкнутой цилиндрической оболочки, заполненной сыпучим материалом, на радиальную нагрузку / К.Ф. Шагивалеев // Изв. вузов. Строительство. – 2003. – № 2. – С. 20–23.
8. Шапошников, Н.Н. Расчет круговых тоннельных обделок на упругом основании, характеризуемом двумя коэффициентами постели / Н.Н. Шапошников // Науч. тр. МИИТ. – 1961. – Вып. 131. – С. 296–305.
9. Attewell, P.B. Ground movements caused by tunnelling in soil / P.B. Attewell // Large ground movements and structures. – London: Pentech Press, 1978. – P. 120–140.
10. Attewell, P.B. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil / P.B. Attewell, J.P. Woodman // Ground Engineering. – 1982. – Vol. 15, N 8. – P. 13–22, 36.

References

1. Aleksandrov A.V., Potapov V.D. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti* (Foundations of the theory of elasticity and plasticity), Moscow, Vysshaya shkola, 1990, 400 p.
2. Gabbasov R.F. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 1970, no. 10, pp. 17–19.
3. Kleyn G.K. *Raschet podzemnyh truboprovodov* (Calculation of underground pipelines), Moscow, Strojizdat, 1969, 240 p.
4. Kositsyn S.B., Dolotkazin D.B. *Raschet sterzhnevyyh sistem, vzaimodejstvuyushchih s uprugim osnovaniem, metodom konechnykh ehlementov s ispol'zovaniem programmnoy kompleksa MSC/NASTRAN FOR WINDOWS* (Calculation of beam systems interacting with an elastic foundation by finite element method using the software complex MSC/NASTRAN FOR WINDOWS), Moscow, MIIT, 2004, 116 p.
5. Leontiev N.N. *Trudy MISI*, 1957, issue 27, pp. 47–69.
6. Prevo R. *Raschet na prochnost' truboprovodov zalozhennykh v grunt* (Strength calculation of pipelines laid in the ground), Moscow, Strojizdat, 1964, 123 p.
7. Shagivaleev K.F. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo*, 2003, no. 2, pp. 20–23.
8. Shaposhnikov N.N. *Nauchnye trudy MIIT*, 1961, no. 131, pp. 296–305.
9. Attewell P.B. Ground movements caused by tunnelling in soil, Large ground movements and structures, London, Pentech Press, 1978, pp. 120–140.
10. Attewell P.B., Woodman J.P. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil, *Ground Engineering*, 1982, vol. 15, no. 8, pp. 13–22, 36.