

Верификация полуэмпирического метода прогноза осадок Р.Б. Пека для щитовой проходки транспортных тоннелей мелкого заложения

И.К. Бехтев

ФГБОУ ВО НИ Московский государственный строительный университет

Аннотация: Исследуется вопрос о возможности применения известного полуэмпирического метода расчета осадок для подземных транспортных тоннелей малого диаметра с учетом поправочных коэффициентов, разработанных для коммуникационных туннелей. Рассматривается взаимосвязь между соотношением относительной глубины заложения и осадки дневной поверхности и выбранными коэффициентами перебора.

Ключевые слова: тоннель, коэффициент перебора, полуэмпирический метод, конечно-элементная модель, мульда оседания, щитовая проходка, ТПМК, поправочный коэффициент, численный метод.

Введение

В настоящее время продолжается активное расширение подземных железнодорожных сетей г. Москвы, начатое ещё в 2010 году. Как правило, подземные транспортные коммуникации проходят вблизи жилой застройки. Многие тоннели возводят закрытым способом на небольшой глубине. Ввиду этого требуется пристальное внимание к применяемым технологиям и расчетным методам. Ошибки проектирования тоннелей пагубно сказываются на величине осадки дневной поверхности, приводят к непригодному для эксплуатации состоянию зданий, оказавшихся в зоне влияния выработки, и даже катастрофам.

Современное состояние вопроса

Одними из главных задач современного тоннелестроения являются совершенствование известных старых и разработка новых, более точных, методов прогноза осадки дневной поверхности над выработкой, а также улучшение технологии проходки. Коэффициент перебора V_l , от которого зависит величина осадки, характеризует долю извлеченных из выработки излишков грунта от проектного объема тоннеля. Исследованиям перебора грунта (который в научной литературе еще называют «потерями грунта») и

его влияния на осадку поверхности посвящены работы [1-3]. В статье [4] в контексте влияния на осадку в зависимости от технологии проходки сравниваются модели коллекторов, сооружаемых бестраншейными способами. В статье [5] описано применение аналитического метода прогноза осадок над коммуникационным тоннелем, возведенным в процессе щитовой проходки. В статьях [6-8] освещены организационные и технологические проблемы проходок, выполненных с применением механизированных средств.

Транспортные и коммуникационные городские подземные тоннели сегодня, как правило, возводят с помощью тоннелепроходческих механизированных комплексов (далее – ТПМК), поскольку считается, что их применение позволяет существенно минимизировать осадки. Данная технология подробнейшим образом обрисована в монографиях [8] и [9].

Важной вехой в развитии подходов к прогнозу осадок признан широко известный полуэмпирический метод Р.Б. Пека [10]. В нем автор предлагает описывать мутьду оседания с помощью функции ошибок, которая имеет следующий вид:

$$S(x) = S_{\max} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i_x^2}}, \quad (1)$$

где S_{\max} – это максимальная осадка поверхности;

i_x – расстояние от вертикальной оси тоннеля до точки перегиба кривой оседания;

x – расстояние от оси тоннеля до любой точки, в которой надо определить просадку.

Величину максимальной осадки можно определить из уравнения, полученного интегрированием формулы (1) [11]:

$$S_{max} = \frac{\pi V_l}{2,5 i_x} \cdot \frac{D^2}{4} \quad (2)$$

Коэффициент перебора V_l может быть определен, как процент отношения объема, заключенного в пространство мульды оседания, к объему выработки. Для предварительных прогнозов осадки берутся ориентировочные значения из нормативных документов или опыта предшественников.

В общем случае параметр i_x может быть определен, как произведение коэффициента ширины впадины K и глубины заложения тоннеля [12]. Применительно к многослойным напластованиям в работе [11] предлагается зависимость вида (3):

$$i_x = K_1 h_1 + K_2 h_2 + \dots + K_n h_n, \quad (3)$$

где h – мощность слоя.

Коэффициент ширины мульды оседания K зависит от типа грунта слоя. Эмпирически были установлены значения K , принимаемые в диапазоне:

0,2...0,3 – для сыпучих грунтов;

0,4...0,5 – для твердых глин;

0,7 – для мягкопластичных и текучепластичных глин.

Изначально формула метода Пека (1) предлагалась к применению для прогноза осадок над транспортными тоннелями глубокого заложения. Для расчета коммуникационных туннелей мелкого заложения (до 12 м) в исследовании [13] для неё было предложено ввести поправочные коэффициенты C_1 и C_2 :

$$C_1 = 1,525 - 1,147\left(\frac{H}{D}\right) + 0,353\left(\frac{H}{D}\right)^2, \quad (4)$$

$$C_2 = 1,23 - 0,871\left(\frac{H}{D}\right) + 0,212\left(\frac{H}{D}\right)^2. \quad (5)$$

С их применением формула (1) принимает вид:

$$S(x) = C_1 \cdot \frac{\pi V_l}{2,5 t_x} \cdot \frac{D^2}{4} \cdot e^{-\frac{C_2 x^2}{2 t_x}} \quad (6)$$

Постановка и решение задачи

Предлагается провести верификацию метода Пека на основе данных планируемой проходки транспортного тоннеля щитовым ТПМК на малой глубине заложения H . Для этого результаты аналитического расчета по данному методу будут сопоставлены с результатами численного моделирования в *Plaxis*. Параметры грунтов численной модели будут назначены в соответствии с данными инженерно-геологических изысканий, проведенных на одной из строительных площадок Новой Москвы (таблица №1).

Таблица № 1

Физико-механические характеристики грунтов исследуемой модели

| № | Наименование | h [м] | e [%] | E [МПа] | ν | φ | c [кПа] |
|---|-------------------------|------------|------------|-----------------------|----------|-----------|--------------|
| 1 | Насыпной грунт | 0,7 | 68 | – ($R_0 = 0,18$) | 0,3 5 | 18 | 20 |
| 2 | Суглинок полутвердый | 1,8 | 68 | 31 | 0,3 7 | 24 | 47 |
| 3 | Супесь пластичная | 2,5 | 77 | 32 | 0,3 3 | 29 | 31 |
| 4 | Суглинок полутвердый | 3 | 46 | 32 | 0,3 5 | 25 | 55 |
| 5 | Суглинок тугопластичный | 6 | 41 | 18 | 0,3 5 | 20 | 28 |
| 6 | Суглинок полутвердый | 4,2 | 49 | 31 | 0,3 5 | 24 | 47 |

Примечание: R_0 – расчетное сопротивление насыпного грунта сжатию.

Всем грунтам присвоена геомеханическая модель поведения *Mohr-Coulomb*.

За неимением эмпирических сведений о коэффициентах перебора V_l для данной модели, в качестве ориентировочных значений приняты коэффициенты перебора из работы [13].

В *Plaxis* коэффициент перебора моделируется через коэффициент контракции c_{ref} . В отличие от руководств, изданных до 2018 года, в современных официальных мануалах *Plaxis* [14] этот параметр рекомендуется принимать равным натурным значениям.

Толщина железобетонного блока обделки кругового очертания принята 300 мм. Диаметр тоннеля по наружному контуру D составляет 6 м.

Выборка тестируемых параметров включает 8 соотношений H/D , каждому из которых соответствует одно значение коэффициента перебора V_l .

В конце каждого теста на экран можно вывести изображение деформаций (рис. 1), полученных конечно-элементной моделью.

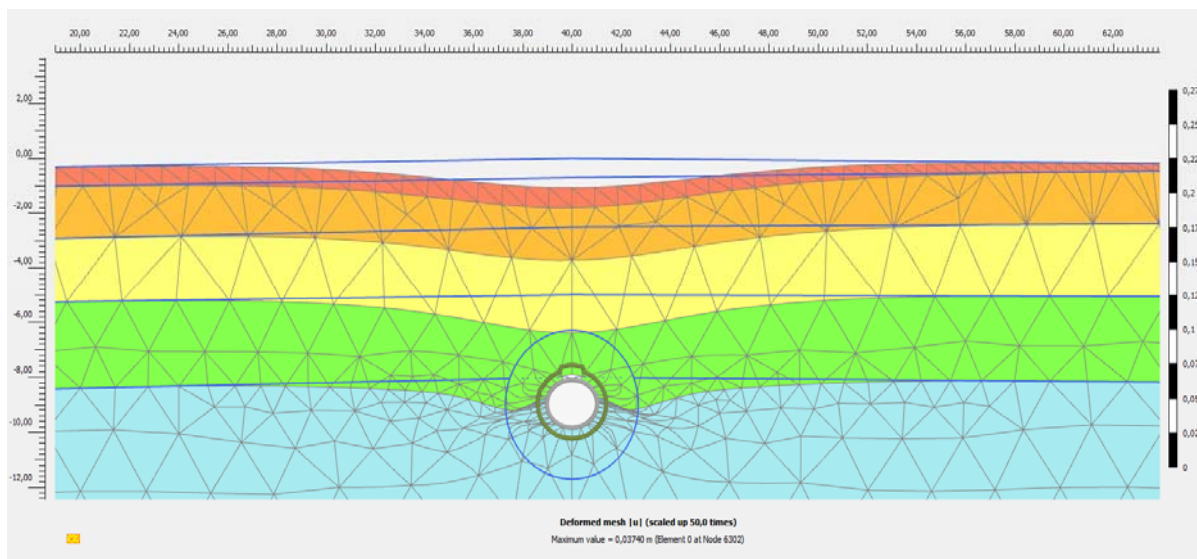


Рис. 1. – Деформации конечно-элементной модели системы «грунт-тоннель».

По формулам (2) и (6) рассчитываются величины максимальных осадок S_{max} (Пек) и S_{max} (Тупиков) соответственно. Значения H/D , V_l и соответствующие им осадки, полученные полуэмпирическими и численным методом, сведены в таблицу № 2.

Таблица №2

Величины осадок в зависимости от соотношения H/D , рассчитанные разными методами

| № | H/D | V_l [%] | S_{max} (Plaxis) [см] | S_{max} (Пек) [см] | S_{max} (Тупиков) [см] |
|---|-------|--------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 1 | 1 | 2,6 | 2,10 | 6,80 | 4,967 |
| 2 | 1.13 | 4,3 | 4,70 | 10,31 | 7 |
| 3 | 1.68 | 2 | 1,4 | 3,552 | 2,11 |
| 4 | 1.69 | 5 | 5,50 | 8,84 | 5,3 |
| 5 | 1.71 | 1,1 | 0,40 | 1,93 | 1,148 |
| 6 | 1.72 | 5 | 5,50 | 8,70 | 5,198 |
| 7 | 1,8 | 5 | 5,30 | 8,40 | 5,075 |
| 8 | 1,9 | 5 | 5,00 | 8,05 | 4,988 |

Для лучшего представления о полученных зависимостях S_{max} (H/D ; V_l) отобразим результаты эксперимента в виде графика (рис. 2)

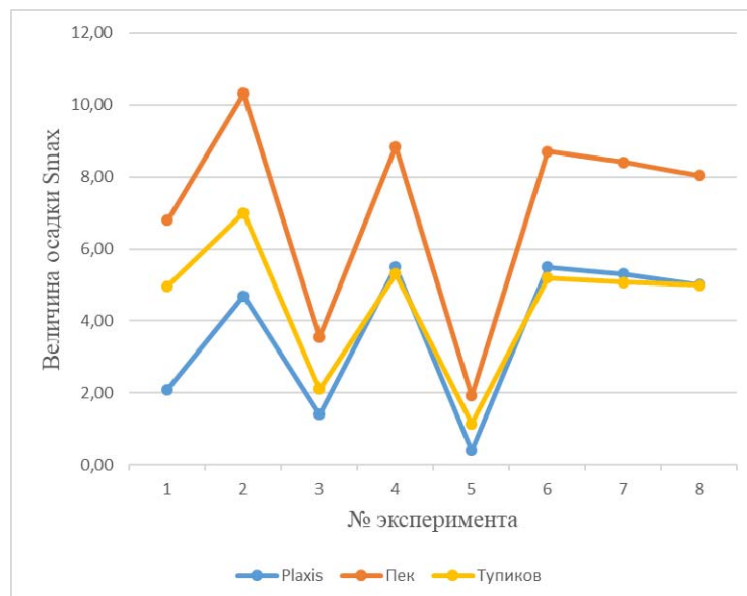


Рис. 2. – График изменения соотношений между максимальной осадкой и относительной глубиной заложения в зависимости от коэффициента перебора V_l .

Существенное сближение графика изменения максимальных осадок, рассчитанного эмпирическим методом, с графиком, построенным по результатам расчетов в *Plaxis*, позволяет предположить, что для данного интервала значений относительной глубины (1,69 - 1,9) заложения при данных параметрах щитовой проходки коэффициенты перебора были подобраны правильно. Процент расхождения численного и эмпирического результатов в позициях 4, 6, 7 и 8 не превышает 5,5%, в то время как в позициях 1, 2, 3 и 5 варьируется от 12,9 до 42% (рис. 3).

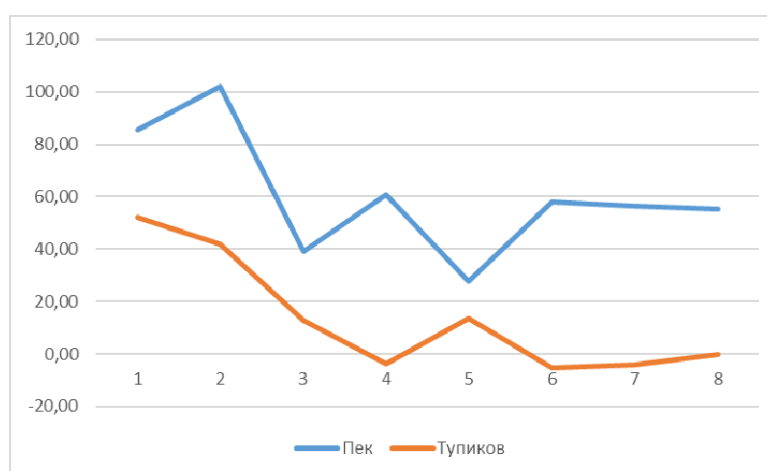


Рис. 3. – Процент расхождения осадок, вычисленных эмпирическим методом в том числе с применением корректировочных коэффициентов, со значениями *Plaxis*.

Начиная с эксперимента 4, можно проследить некую корреляцию между относительной глубиной заложения и величиной осадки при $V_l = 5\%$. Если, исходя из данного наблюдения, повторить пятый эксперимент с заменой $V_l = 1,1\%$ на 5% , то процент расхождения осадок в пятой позиции снизится с $13,6\%$ до более оптимальных $5,5\%$. В то же время, подобный алгоритм не позволяет улучшить ситуацию в позициях 1-3, что может свидетельствовать о невалидности принятых в них пар H/D и V_l .

Заклучение

Итоги исследования позволяют обозначить выводы следующего характера:

1) Опытные коэффициенты перебора, полученные предыдущими исследователями, не универсальны для любых параметров щитовой проходки и не заменяют нам собственных наблюдений; их применение может носить лишь рекомендательный характер.

2) Эмпирический метод Пека устаревает, спектр его применения серьезно ограничен без вспомогательных корректировок.

3) С увеличением относительной глубины заложения транспортного тоннеля H/D наблюдается тенденция к повышению точности прогноза осадки дневной поверхности по эмпирическому методу Пека (с учетом поправочных коэффициентов Тупикова М.М. [14]) ;

4) Для относительных глубин заложения транспортного тоннеля в интервале значений H/D 1–1,68 расчет осадок выбранным эмпирическим методом при данных коэффициентах перебора не дал удовлетворительного результата. Для продолжения исследований необходимо провести дополнительные натурные наблюдения за строительством транспортных тоннелей малого диаметра.

5) Для предварительных расчетов осадок дневной поверхности по эмпирическому методу Пека на интервале относительных глубин заложения транспортного тоннеля H/D 1,69 – 1,9 может быть рекомендован коэффициент перебора 5% при диаметре щита 6 м (с учетом поправочных коэффициентов Тупикова М.М. [14]).

6) Метод Пека может рекомендован для предварительной оценки осадки дневной поверхности над транспортными тоннелями диаметром 6 м при глубинах заложения 10,14 - 11,4 м. Возможность применения данного

метода при меньших глубинах стоит под вопросом и требует дополнительных исследований.

Литература

1. Ishak, N.A. and R.A. Abdullah, 2016. Review of volume loss with respect to the tunnel construction techniques, soil properties and geometrical condition. Conference: Proceedings of The 11th International Civil Engineering Postgraduate Conference - The 1st International Symposium on Expertise of Engineering Design (SEPKA-ISEED'16) (issue 28), Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, pp: 565-577.
2. Vu, M.N., W. Broere and J. Bosch, 2016. Volume loss in shallow tunneling. Tunneling and Underground Space Technology, 59: pp.77-90.
3. Власов С.Н., Маковский Л.В., Меркин В.Е. Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов. М.: ТИМР, 2000. 199 с.
4. Манько А.В. Моделирование проходки коллектора под действующей автомагистралью. // Инженерный вестник Дона. 2020. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2020/6382
5. Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Тупиков М.М. Прогноз осадок зданий при прокладке коммуникационных тоннелей мелкого заложения в Москве. // Вестник гражданских инженеров. СПб.: СПбГАСУ, 2011. № 1 (26). С. 67 – 71.
6. Носенко А.С., Домницкий А.А., Меньшенина Е.А. Физико-механические процесса погрузки при проходке тоннелей с учетом влияния характеристик материала. // Инженерный вестник Дона. 2016. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3611

7. Шемшуря Е.А. Пути оптимизации системы эксплуатации горнопроходческого оборудования. // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_29_shemshura.pdf_2001.pdf
8. Мазеин С.В., Павленко А.М. Влияние текущих параметров щитовой проходки на осадку поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень: материал семинара №15. 2007. №5. С. 133-138.
9. Maidl, B., M. Herrenknecht, U. Maidl, G. Wehreymer and D.S. Sturge, 2012. Mechanised Shield Tunnelling. Berlin: Ernst & Sohn.
10. Witke W. [and others]. 2007. Stability Analysis and Design for Mechanized Tunneling. Aachen. Geotechnik in Forschung und Praxis.
11. Peck R.B., 1969. Deep excavations and tunneling in soft ground. State of the art report. Conference: Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico, pp: 225-290.
12. Карасев М.А. Прогноз геомеханических процессов в слоистых породных массивах при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации в условиях плотной городской застройки: дис. ...д-ра. техн. наук. СПб., 2017. 307 с.
13. O'Reilly, M.P. and New, B.M. 1982. Settlements above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction. Conference: Proceedings of Tunnelling 82, Institution of mining and metallurgy. London, pp: 173-181.
14. Тупиков М.М.. Особенности деформирования грунтового массива и сооружений при строительстве мелкозаглубленных коммуникационных тоннелей в городских условиях: дис. ...канд. техн. наук. М., 2010. 184 с.

References

1. Ishak, N.A. and R.A. Abdullah, 2016. Conference: Proceedings of The 11th International Civil Engineering Post-graduate Conference - The 1st International Symposium on Expertise of Engineering Design (SEPKA-
-



ISEED'16) (issue 28), Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia. Pp: 565-577.

2. Vu, M.N., W. Broere and J. Bosch, 2016. Volume loss in shallow tunneling. Tunneling and Underground Space Technology, 59: pp.77-90.

3. Vlasov S.N., Makovskiy L.V., Merkin V.E. Avariynnye situatsii pri stroitel'stve i ekspluatatsii transportnykh tonneley i metropolitenov [Emergencies during the construction and operation of transport tunnels and subways]. M.: TIMR, 2000. 199 p.

4. Man'ko A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2020/6382

5. Il'ichev V.A., Nikiforova N.S., Tupikov M.M. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. SPb.: SPbGASU, 2011. № 1 (26). Pp: 67 – 71.

6. Nosenko A.S., Domnitskiy A.A., Men'shenina E.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3611

7. Shemshchura E.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №4. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_29_shemshura.pdf_2001.pdf

8. Mazein S.V., Pavlenko A.M. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten': material seminara №15. 2007. №5. Pp: 133-138.

9. Maidl, B., M. Herrenknecht, U. Maidl, G. Wehreymer and D.S. Sturge, 2012. Mechanised Shield Tunnelling. Berlin: Ernst & Sohn.

10. Witke W. [and others]. 2007. Stability Analysis and Design for Mechanized Tunneling. Aachen.: Geotechnik in Forschung und Praxis.

11. Peck R.B., 1969. Conference: Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico. Pp: 225-290.

12. Karasev M.A. Prognoz geomekhanicheskikh protsessov v sloistyykh porodnykh massivakh pri stroitel'stve podzemnykh sooruzheniy slozhnoy prostranstvennoy konfiguratsii v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki [The forecast of geomechanical processes in layered rock masses during the construction of



underground structures of complex spatial configuration in a dense urban area]: dis. ...d-ra. tekhn. nauk. SPb., 2017. 307 p.

13. O'Reilly, M.P. and New, B.M. 1982. Conference: Proceedings of Tunnelling 82, Institution of mining and metallurgy. London, pp: 173-181.

14. Tupikov M.M. Osobennosti deformirovaniya gruntovogo massiva i sooruzheniy pri stroitel'stve melkozaglublennykh kommunikatsionnykh tonneley v gorodskikh usloviyakh [Features of the deformation of the soil massif and structures during the construction of shallow communication tunnels in urban conditions]: dis. ...kand. tekhn. nauk. M., 2010. 184 p.