

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2019, №3, Том 6 / 2019, No 3, Vol 6 <https://t-s.today/issue-3-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/18SATS319.pdf>

DOI: 10.15862/18SATS319 (<http://dx.doi.org/10.15862/18SATS319>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Гуськов И.А., Пестрякова Е.А., Харитонов С.С., Титов Е.Ю. Методы оценки осадок при проходке тоннелей с использованием тоннелепроходческих механизированных комплексов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №3, <https://t-s.today/PDF/18SATS319.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/18SATS319

For citation:

Guskov I.A., Pestryakova E.A., Kharitonov S.S., Titov E.Yu. (2019). Methods for estimating sediment during tunneling using a mechanized tunneling. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/18SATS319.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/18SATS319

УДК 72

Гуськов Илья Александрович

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия

Студент

E-mail: Ilya.6210@gmail.com

Пестрякова Екатерина Алексеевна

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия

Старший преподаватель кафедры «Мосты и тоннели»

E-mail: Kate.pestriakova@gmail.com

Харитонов Сергей Сергеевич

ООО «Метропроект-М», Москва, Россия

Инженер

E-mail: Mr.kharitonov.94@mail.ru

Титов Евгений Юрьевич

Объединенный совет ОАО «РЖД», Москва, Россия

Ученый секретарь

Кандидат технических наук

E-mail: Etitov80@gmail.com

Методы оценки осадок при проходке тоннелей с использованием тоннелепроходческих механизированных комплексов

Аннотация. В настоящее время с развитием многих городов увеличивается потребность в транспортной инфраструктуре. Поскольку свободное наземное пространство в городских условиях ограничено, то наиболее эффективным и рациональным выходом является строительство подземных сооружений. В настоящее время разрабатываются новые проекты подземного строительства в условиях высокой плотности застройки, и во многих случаях в районах, в которых расположены древние сооружения и здания, представляющие историческую ценность.

Эффективность проектных решений по защите объектов, находящихся в зоне проходке тоннелей, напрямую зависит от точности и достоверности методов, оценивающих влияние

факторов, которые оказывают негативное влияние. Причём, если станционные комплексы зачастую сооружаются на территориях с минимальным влиянием на окружающую застройку, а их строительство ведется средствами малой механизации и небольшими заходками, то при строительстве перегонных тоннелей, в зону их влияния могут попасть сооружения, представляющие историческую и культурную ценность. Авторами статьи были рассмотрены как причины возникновения осадок, так и эмпирические, аналитические и численные методы их оценки. В частности, среди аналитических методов, был выделен метод, разработанный в МИИТе и основанный на теореме взаимности. Также в статье приводится сравнение результатов расчета осадки по метод Ю.А. Лиманова и расчета в программном комплексе PLAXIS. В конце авторы приводят выводы, основанные на анализе всех вышеперечисленных методов, а также рекомендации по снижению осадок при проходке тоннелей с использованием тоннелепроходческих механизированных комплексов.

Ключевые слова: метрополитен; осадки грунта; метод Ю.А. Лиманова; напряженно-деформированное состояние грунтового массива; мульда осадок; упругое пространство; щитовая проходка

Введение

Во многих случаях проходка тоннелей осуществляются в непосредственной близости от существующих зданий и сооружений. Она неизбежно вызывает малые или большие вертикальные и горизонтальные перемещения грунта, которые могут повлечь за собой повреждения зданий и сооружений, расположенных вблизи строящихся трасс метро. Эти последствия могут быть так же весьма значительными, если строительство тоннеля осуществляется в непосредственной близости к существующим свайным фундаментом в неустойчивых грунтах.

Классификация осадок:

Осадки поверхности грунта при щитовой проходке подразделяют на четыре категории:

- осадки в связи с переборами грунта в забое;
- осадки в связи с неточностью ведения щита по трассе тоннеля;
- осадки перед и над забоем;
- осадки, происходящие в процессе нагнетания раствора за обделку.

Причины осадок при щитовой проходке:

1. Потеря равновесия между давлением грунта и грунтовой воды и противодействием головной части щита.

Если скорость продвижения и скорость выдачи разработанного грунта не синхронизированы в щитах с грунто-пригрузом, давление внутри призабойной камеры становится отличным от давления грунта и грунтовой воды в забое, что ведет к подвижкам грунта перед и над щитом. При этом если давление в камере меньше, чем давление грунта и грунтовой воды, происходят осадки поверхности. В противоположной ситуации происходит подъем поверхности. Эти явления обусловлены ослаблением одного из противодействующих давлений в забое и возникновением упругопластических деформаций под воздействием большего давления.

2. Нарушения состояния грунтов во время продвижения щита.

Изменение состояния грунта вследствие продвижения щита и трения по грунту наружной поверхности щитового корпуса могут повести к подъему или осадкам окружающего грунта и поверхности. Внешняя подработка грунта для изменения направления движения щитовой машины также может вызвать разрыхление грунта.

3. Возникновение свободного пространства за хвостовой оболочкой при движении щитовой машины и неудовлетворительное нагнетание тампонажного раствора.

Ввиду возникновения указанного свободного пространства грунт, находящийся на щитовой оболочке, оседает, при этом в грунте происходят упругопластические деформации, вызванные ослаблением напряженного состояния окружающих грунтов. Величина осадок грунта при этом зависит от материала тампонажного раствора, времени и мест нагнетания, а также от давления и объема нагнетания. Излишнее давления нагнетания может стать причиной временного подъема грунтов.

4. Деформация и смещения первичной тоннельной обделки.

Если соединительные болты обделки недостаточно затянуты, то кольца тоннельной обделки могут деформироваться. Это увеличивает осадки грунта после выхода очередного кольца обделки из-под хвостовой оболочки вследствие увеличения свободного зазора или деформации обделки под несбалансированными (неуравновешенными) нагрузками.

5. Снижение уровня грунтовой воды.

Если вода вытекает в щит из забоя или протекает через стыки первичной обделки, уровень грунтовой воды снижается, что ведет к осадкам грунта.

Кроме того, источниками осадок могут быть вибрации, вызванные бурением и работой породопогрузочных машин. Осадки такого рода были отмечены в сыпучих породах разных типов и в скальных породах, над которыми располагались слабые породы.

1. Эмпирические методы

1.1 Метод оценки с помощью функции ошибок Гаусса

Среди эмпирических методов следует отметить оценку поверхности мульды осадки с использованием функции ошибки Гаусса. В основу этого метода положено равенство объема мульды осадки поверхности грунта и объёма, заполняющего пространство, возникшее вследствие деформации обделки тоннеля. В частном случае при отсутствии крепи объём мульды равен объёму вынутаго грунта. Вертикальные перемещения, возникают не только непосредственно над тоннелем, но и захватывают, расположенные на некотором расстоянии от оси тоннеля. Графики перемещений поверхности грунта называют мульдами осадок. Американский учёный Реск предложил описывать кривую поперечной мульды осадки функцией ошибок Гаусса. С тех пор это простое математическое описание получило широкое распространение во многих странах мира.

В соответствии с этим подходом, вертикальная осадка в поперечном направлении определяется по формуле:

$$S_v(x) = S_{v,\max} e^{-\frac{x^2}{2l_x^2}} \quad (1.1)$$

где $S_{v,\max}$ – максимальная осадка, над осевой линией тоннеля; l_x – параметр, характеризующий ширину мульды.

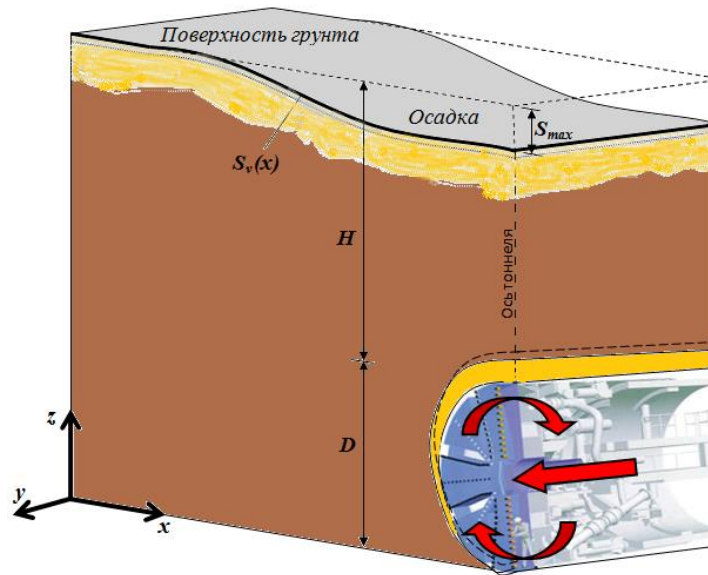


Рисунок 1. Расчетная схема для оценки осадок с помощью функции ошибок Гаусса [3]

Можно отметить, что кривая мульды имеет максимальный наклон в точке перегиба, которая расположена на расстоянии l_x от осевой линии тоннеля. Эта точка является критическим параметром при определении критериев деформации здания.

Величина осадок, возникающих при проходке тоннелей, часто характеризуется объёмом «потерянного грунта», представляемого в процентах от полного выбранного объёма грунта. Величина осадок, приходящихся на единицу длины тоннеля, определяется путём интегрирования функции ошибок Гаусса. Следовательно, приложенная область мульдой осадки могла выразиться:

$$V_s = \int_{-\infty}^{\infty} S_v dx = \sqrt{2\pi} l_x S_{v,\max} \quad (1.2)$$

где V_s – объём мульды осадки на единицу длины.

Для тоннелей в не дренируемых глинах объём грунта остаётся неизменным. Поэтому объём поверхностной мульды осадки, равен объёму грунта, который удалён сверх теоретического объёма тоннеля. Обычно этот дополнительный объём определяется в виде пропорции на единицу длины объёма тоннеля:

$$V_L = \frac{V_s}{\pi \frac{D^2}{4}} \quad (1.3)$$

где V_L – потеря объёма, D – внешний диаметр тоннеля. С помощью уравнений (1.1) к (1.3) поперечный профиль осадки может быть выражен в терминах потери объёма:

$$S_v(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{V_L D^2}{4l_x} e^{-\frac{x^2}{2l_x^2}} \quad (1.4)$$

Для заданного диаметра тоннеля D , форма и величина поперечной кривой осадки только зависит от потери объёма V_L и ширины мульды l_x . Параметр ширины мульды (l) определен как расстояние точки перегиба от оси тоннеля. В работе O'Reilly и New получено выражение:

$$l = K \cdot z_0$$

где $K = 0,4$ до $0,7$ для жесткой и мягкой глины, соответственно и принимать значение $K = 0,25$ для песков, $z_0 =$ глубина заложения тоннеля (расстояние от оси тоннеля до поверхности).

1.2 Методы оценки осадки грунта по Ю.А. Лиманову

Среди российских учёных в первую очередь следует отметить исследования Ю.А. Лиманова. Для расчета осадок поверхности грунта при сооружении тоннелей в кембрийских глинах, над которым расположены слабые породы четвертичных отложений, Ю.А. Лиманов предложил формулу:

$$\eta(x) = \eta_0 \left(1 - \frac{x}{L}\right)^4 e^{\frac{4x}{L}} \quad (1.5)$$

$$\eta_0 = \frac{F}{L}, \quad L = l_{л.к} + 2h_1 \operatorname{ctg} \theta \quad (1.6)$$

$$l_{л.к} = 2\sqrt{h_2^2 - r^2} \quad (1.7)$$

где x – абсцисса точки поверхности земли; e – основание натуральных логарифмов; F – площадь полумульды осадки линии контакта кембрийских глин и слабых пород; h_1 – толщина слабых пород; h_2 – расстояние от линии контакта пород до центра тоннельной выработки; $l_{л.к}$ – длина полумульды осадки линии контакта пород; r – радиус выработки.

Площадь F определяют по формуле, которую можно привести к виду

$$F = 8\pi(1 - \mu^2) \frac{\sigma h_2 r^2}{E_0 l_{л.к}} \quad (1.8)$$

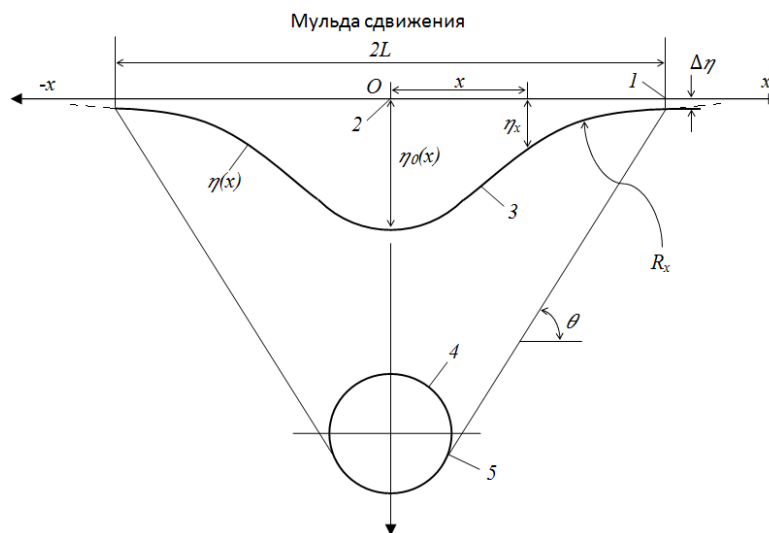


Рисунок 2. Расчетная схема для оценки осадок методом Ю.А. Лиманова [1]

где μ – коэффициент Пуассона кембрийских глин; σ – среднее значение природных напряжений, действующих по контуру выработки; E_0 – модуль деформации кембрийских глин.

При выводе формулы (1.5) Ю.А. Лиманов использовал результаты измерений осадок поверхности грунта при проходке тоннелей. Автор рекомендовал использовать эту формулу для инженерно-геологических условий строительства тоннелей глубокого заложения Ленинградского метрополитена.

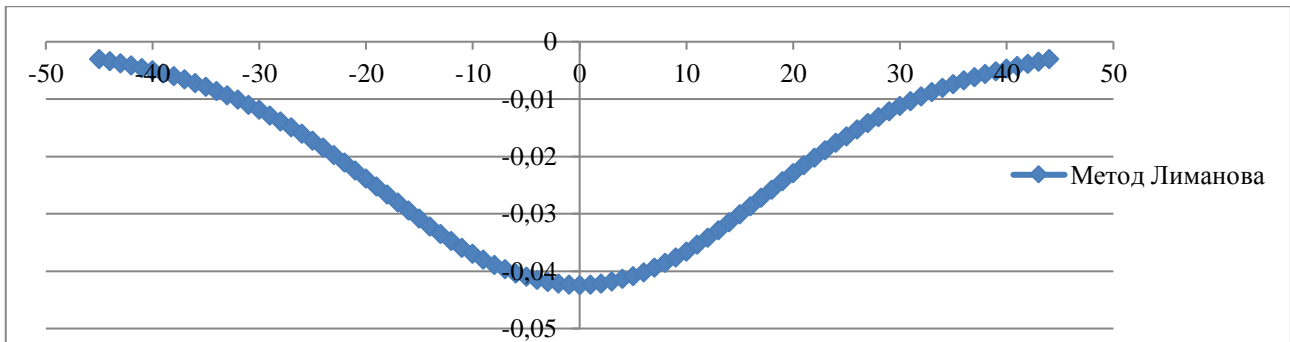


Рисунок 3. Результаты расчета осадки методом Ю.А. Лиманова (разработано автором)

2. Аналитические методы оценки осадки грунта

Для определения осадок поверхности грунта в замкнутом аналитическом виде используются различные модели грунтов и, в частности, упругие модели. При оценке воздействий на фундаменты для тоннелей глубокого заложения в некоторых случаях используются решения для бесконечных сред.

Это решение можно считать справедливым, но, тем не менее, оценочным, если влиянием свободной поверхности на распределение напряжений у основания фундамента можно пренебречь.

Наиболее часто используются решения плоской задачи теории упругости для пространства и полупространства.

Для тоннелей мелкого заложения свободная поверхность значительно влияет на распределение напряжений и перемещений. Используя решение для бесконечной области и теорию функций комплексного переменного, учёные Verruijt и Booker (1996) получили аналитическое решения для полуплоскости.

$$u_x = -\varepsilon a^2 x \left(\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} \right) + \delta a^2 x \left\{ \frac{(x^2 - kz_1^2)}{r_1^4} + \frac{(x^2 - kz_2^2)}{r_2^4} \right\} - \frac{2\varepsilon a^2 x}{m} \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{2mzz_2}{r_2^4} \right) - \frac{4\delta a^2 xH}{m+1} \left\{ \frac{z_2}{r_2^4} + \frac{mz(x^2 - 3z_2^2)}{r_2^6} \right\} \quad (2.1)$$

$$u_z = -\varepsilon a^2 \left(\frac{z_1}{r_1^2} - \frac{z_2}{r_2^2} \right) + \delta a^2 \left\{ \frac{z_1(kx^2 - z_1^2)}{r_1^4} + \frac{z_2(kx^2 - z_2^2)}{r_2^4} \right\} + \frac{2\varepsilon a^2}{m} \left(\frac{(m+1)z_2}{r_2^2} - \frac{mz(x^2 - z_2^2)}{r_2^4} \right) - 2\delta a^2 H \left\{ \frac{x^2 - z_2^2}{r_2^4} + \frac{m}{m+1} \frac{2zz_2(3x^2 - z_2^2)}{r_2^6} \right\} \quad (2.2)$$

где δ – долгосрочная деформация грунта из-за овализации обделки тоннеля, $z_1 = z - H$, $z_2 = z + H$, $r_1^2 = x^2 + z_1^2$, $r_2^2 = x^2 + z_2^2$, $m = 1/(1 - 2\nu)$, $k = \nu/(1 - \nu)$, ν – коэффициент Пуассона грунта.

При решении использовался метод Sagaseta (1987) и для случая равномерной потери грунта представили решение в аналитическом виде.

Loganathan и Poulos (1998) предложили для неосушенных грунтов использовать коэффициент Пуассона, равный $\nu_u = 0.5$ и коэффициент бокового давления $k = 1$, для определения осадок за малый промежуток времени. Так как, деформациями грунта из-за долгосрочной потери круглой формы обделки тоннеля можно пренебречь, то есть можно принять $\delta = 0$.

Тогда, выражения деформации грунта могут быть упрощены, так как в расчёт необходимо принимать только с равномерную радиальную потерю грунта:

$$u_x = -\varepsilon a^2 x \left(\frac{1}{x^2 + (z - H)^2} + \frac{1}{x^2 + (z + H)^2} - \frac{4z(z + H)}{[x^2 + (z + H)^2]^2} \right) \quad (2.3)$$

$$u_z = \varepsilon a^2 \left(-\frac{z - H}{x^2 + (z - H)^2} + \frac{z + H}{x^2 + (z + H)^2} - \frac{2z[x^2 - (z + H)^2]}{[x^2 + (z + H)^2]^2} \right) \quad (2.4)$$

Исследователи Sagaseta (1987), Verruijt и Booker (1996) для определения величины «потерь грунта» использовали радиальную «потерю грунта» с постоянным радиальным перемещением вокруг тоннеля. Такое определение величины «потери грунта» справедливо, когда вокруг тоннельной обделки существует постоянный зазор, который заполняется окружающим тоннель грунтом. Используются другие методики и способы для определения «потерь грунта».

Представим наиболее известные способы и определения:

1. *Радиальная усадка (равномерная радиальная потеря грунта):*

$$\varepsilon_1 = \frac{u_0}{a} \quad (\text{Verruijt and Booker, 1996}).$$

2. *Модифицированная эквивалентная величина «потери грунта»:*

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_3 \times \exp \left\{ - \left[\frac{1.38x^2}{(H + a)^2} + \frac{0.69z^2}{H^2} \right] \right\} \quad (\text{Loganathan and Poulos, 1998}).$$

В МИИТ-е разработан аналитический метод оценки осадки поверхности грунта, основанный на теореме взаимности, который можно сформулировать следующим образом.

Если сила F , приложенная в направлении α в некоторой точке A упругого, анизотропного, неоднородного пространства, вызывает в другой точке B в направлении β перемещение, равное u , тогда эта же сила F , приложенная в точке B в направлении β , вызовет в точке A в направлении α перемещение, равное u .

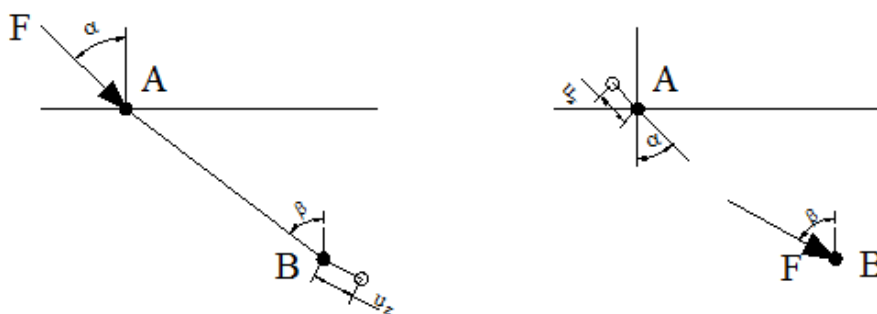


Рисунок 4. Расчетная схема для оценки осадок с помощью теоремы взаимности [6]

Для этой цели используются известные аналитические решения: перемещений точек грунта упругого полупространства при воздействии вертикальных сил. Исходными данными для вычисления вертикальных перемещений поверхности грунта являются функции перемещения контура полости.

3. Численные методы

В последние годы при расчёте сооружений широкое распространение получили численные методы. Для анализа поведения подземных сооружений и конструкций, находящихся вблизи строящихся трасс метро, часто используется метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в различных программных комплексах. Для расчёта подземных сооружений наиболее часто используется программный комплекс PLAXIS. Кроме того, инженерами широко применяются и другие пакеты программ, такие как MATLAB и MathCAD и т. д. Автором настоящей работы используются PLAXIS и MATLAB.

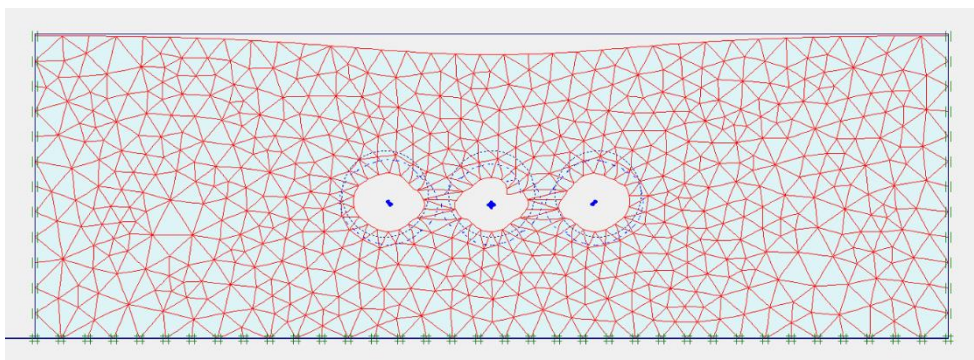


Рисунок 5. Результаты расчета осадки с помощью программного комплекса Plaxis (разработано автором)

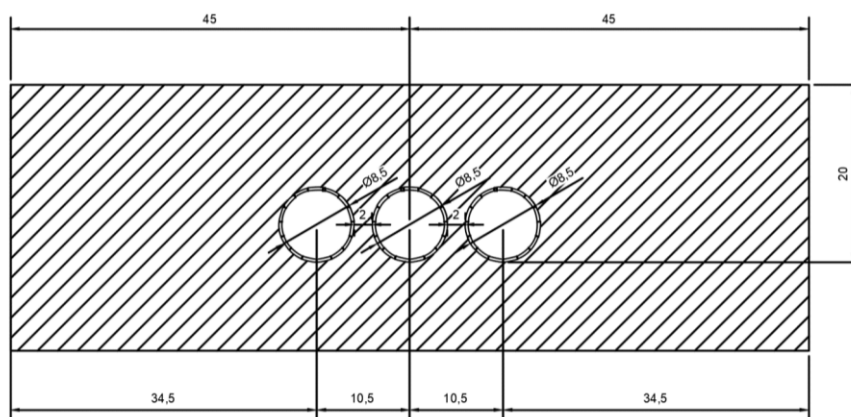


Рисунок 6. Расчетная схема (разработано автором)

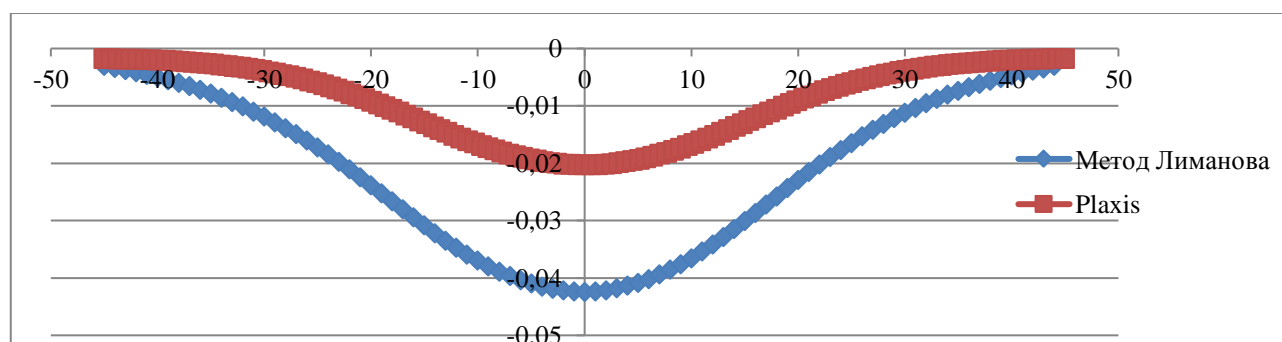


Рисунок 7. Сравнение результатов эмпирического и численного методов (разработано автором)

Выводы

1. Анализ исследований российских и зарубежных учёных показывает, что эмпирические методы и аналитические модели, в которых применяются модели упругого пространства или полупространства широко используются как в России, так и в различных странах мира для оценки осадок поверхности грунта при проходке тоннелей.
2. Эмпирические методы позволяют быстро и с достаточной точностью определять параметры мульды осадки.
3. Недостатком эмпирических методов и формул является возможность их применения только для строго определенных инженерно-геологических условий и способов сооружения тоннелей. Это обстоятельство ограничивает, а в некоторых случаях исключает возможность использования эмпирических формул для расчета параметров мульды осадки. Эти методы не позволяют принять в расчет такие факторы как физико-механические характеристики горных пород и особенности инженерно-геологических условий строительства тоннелей.
4. Аналитические решения так же позволяют получить быстро и достаточной точностью оценки осадок поверхности грунта при проходке тоннелей щитовым способом в глинах, или в мягких породах, в тех случаях, когда пластические деформации в окрестности выработки малы.
5. Аналитические решения позволяют получить информацию о распределении напряжений и перемещений грунта на разных глубинах для различных грунтов.
6. Используя аналитические решения, можно получить перемещения поверхности грунта и для процесса нагнетания раствора за тоннельную обделку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лиманов Ю.А. Осадки земной поверхности при сооружении тоннелей в кембрийских глинах. – Л.: ЛИИЖТ, 1957. – 238 с.
2. Лиманов Ю.А., Артюков Е.И. Осадки земной поверхности при сооружении тоннелей в четвертичных отложениях. – Транспортное строительство, 1972, № 2, с. 45–47.
3. Verruijt, A., Booker, J.R., 1996. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane. *Geotechnique* 46 (4), 753–756.
4. Loganathan, N., Poulos, H.G., 1998. Analytical prediction for tunnelling-induced ground movements in clays. *J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE* 124 (9), 846–856.
5. Курбацкий Е.Н.: “Использование теоремы взаимности для оценки уровней вибраций поверхности упругого полупространства от точечного источника, расположенного внутри полупространства Вестник МИИТа” No-13, 2005.
6. Аунг Мо Хейн.: "Оценка техногенных воздействий на окружающую среду при проходке тоннелей, сооружаемых щитовым способом". Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. МИИТ, Москва, 2010. – 108 с.
7. Дашевский М.А. Излучение упругих волн при движении пульсирующей нагрузки вдоль тоннеля кругового очертания, проложенного в грунте // Труды ин-та / ЦНИИСК им. Кучеренко. – Динамика сооружений. – М.: Стройиздат, 1968. – с. 123–132.
8. Дашевский М.А. Колебания грунта вблизи тоннелей метро мелкого заложения // Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений: Тезисы IV Всесоюз. конф. Ташкент, 1977. – т.1. – с. 111–114.
9. Broch J.T. “Mechanical vibration and shock measurements”, B&K, 1980.
10. Cherry, J.T., Jr.: The Azimuthal and Polar Radiation Patterns Obtained from a Horizontal Stress Applied at the Surface of an Elastic Half Space, *Bull. Seismological Soc. Am.*, vol. 52, pp. 27–36, 1962.

Guskov Ilya Aleksandrovich

Russian university of transport (МИИТ), Moscow, Russia
E-mail: Ilya.6210@gmail.com

Pestryakova Ekaterina Alekseevna

Russian university of transport (МИИТ), Moscow, Russia
E-mail: Kate.pestriakova@gmail.com

Kharitonov Sergey Sergeevich

Metroprojectm, Moscow, Russia
E-mail: Mr.kharitonov.94@mail.ru

Titov Evgeny Yurievich

Railway research institute, Moscow, Russia
E-mail: Etitov80@gmail.com

Methods for estimating sediment during tunneling using a mechanized tunneling

Abstract. Currently, with the development of many cities, the need for transport infrastructure is increasing. Since the free ground space in urban environments is limited, the most effective and efficient exit is the construction of underground structures. Currently, new underground construction projects are being developed in conditions of high density of development, and in many cases in areas where ancient structures and buildings of historical value are located.

The effectiveness of design solutions for the protection of objects in the zone of tunneling depends on the accuracy and reliability of methods that assess the impact of factors that have a negative impact. Moreover, if the station complexes are often built in areas with minimal impact on the surrounding buildings, and their construction is carried out by means of small mechanization and small visits, then the construction of tunnels, in the zone of their influence can get buildings of historical and cultural value. The authors of the article have considered both the causes of sediment and empirical, analytical and numerical methods for their evaluation. In particular, among the analytical methods, the method developed in MIIT and based on the reciprocity theorem was distinguished. The article also compares the calculation results for precipitation method Yu.A. Limanova and calculation in program complex PLAXIS. In the end, the authors give conclusions based on the analysis of all the above methods, as well as recommendations for reducing sediment during tunneling with the use of tunnel mechanized complexes.

Keywords: underground; ground sediments; method Yu.A. Limanova; stress-strain state of the soil massif; trough sediment; elastic space; shield penetration

REFERENCES

1. Limanov Yu.A. (1957). Osadki zemnoy poverkhnosti pri sooruzhenii tonneley v kembriyskikh glinakh. [*Precipitation of the earth during the construction of tunnels in Cambrian clays.*] Leningrad: Leningrad Institute of Railway Engineers, p. 238.
2. Limanov Yu.A., Artyukov E.I. (1972). Precipitation of the earth's surface during the construction of tunnels in Quaternary sediments. *Transport construction*, 2, pp. 45–47 (in Russian).
3. Verruijt A., Booker J.R. (1996). Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane. *Geotechnique*, 46(4), pp. 753–756.
4. Loganathan N., Poulos H.G. (1998). Analytical prediction for tunnelling-induced ground movements in clays. *J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE*, 124(9), pp. 846–856.
5. Курбацкий Е.Н. (2005). Using the reciprocity theorem to estimate the vibration levels of the surface of an elastic half-space from a point source located inside the half-space. *Bulletin Moscow Institute of Transport Engineers*, 13 (in Russian).
6. Aung Mo Kheyn (2010). Otsenka tekhnogennykh vozdeystviy na okruzhayushchuyu sredu pri prokhodke tonneley, sooruzhaemykh shchitovym sposobom. [*Assessment of anthropogenic environmental impacts when driving tunnels constructed with a shield method.*] Moscow: Moscow Institute of Transport Engineers, p. 108.
7. Dashevskiy M.A. (1968). Izluchenie uprugikh voln pri dvizhenii pul'siruyushchey nagruzki vdol' tonnelya krugovogo ochertaniya, prolozhennogo v grunte. [*The radiation of elastic waves during the movement of a pulsating load along a tunnel of circular shape laid in the ground.*] Moscow: Stroyizdat, pp. 123–132.
8. Dashevskiy M.A. (1977). Kolebaniya grunta vblizi tonneley metro melkogo zalozheniya. [*Ground vibrations near shallow subway tunnels.*] Tashkent, pp. 111–114.
9. Broch J.T. (1980). Mechanical vibration and shock measurements. *B&K*.
10. Cherry J.T. (1962). The Azimuthal and Polar Radiation Patterns Obtained from a Horizontal Stress Applied at the Surface of an Elastic Half Space. *Bull. Seismological Soc. Am.*, 52, pp. 27–36 (in Russian).