

Костенко Богдан Валерьевич

аспирант

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»

инженер первой категории

ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»

г. Санкт-Петербург

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СМЕЩЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОДОЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ ПРИ ПРОХОДКЕ ТОННЕЛЕЙ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ СТАНЦИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА ЗАКРЫТЫМ СПОСОБОМ

***Аннотация:** в настоящее время оседание земной поверхности при проходке тоннелей и строительстве станций метрополитена рассчитывается численным моделированием МКЭ или эмпирическими методиками. Оба метода не учитывают фактор времени. В данной статье предложена идея методики, учитывающий время.*

***Ключевые слова:** мульда оседания, время, тоннели, разуплотнение, модуль деформации, коэффициент пористости.*

1. Анализ и критика существующих методов

В настоящее время задача смещения земной поверхности при проходке тоннелей и строительстве станций метрополитена закрытым способом решается либо на основании аналитически-эмпирического метода Ю.А. Лиманова и В.Ф. Подакова, либо математическим моделированием МКЭ.

С одной стороны первый метод прост в использовании (достаточно простые расчеты) и дает результаты близкие к реальным. Кроме того, будучи эмпирическим, метод становится все более и более точным при производстве работ и накоплении статистического материала. С другой стороны: а) такой статистический материал никто не собирает (кроме аварийных ситуаций); б) в качестве результата можно получить лишь некоторое конечное значение осадки, при этом совершенно не учитывается, что в некоторых случаях малые значения осадок (не

конечные осадки) могут быть опаснее для вышерасположенной застройки; в) сложно учесть мероприятия по улучшению горнопроходческих работ, влияющие на значения оседаний) значения оседаний зависят от скорости проходки, а в расчетах заложен некий «нормальный» темп.

Математическое моделирование может решать довольно сложные статические задачи с учетом этапности работ, слоистости основания, сложности геометрии станций метрополитена. При этом необходимо некоторое «волевое решение» в выборе модели грунта, уйма времени, надежда на создание адекватной автоматической сетки конечных элементов и вера в минимальную погрешность метода. При этом такие расчеты превращаются в настоящие «научные» задачи, в отчетах о которых гигантское количество конечных элементов, сложность геометрической схемы и большое количество механических характеристик грунта, непонятно как получаемых, позиционируются как достоинства модели и признаки ее высокой точности.

При этом есть вопросы, с которыми не справятся оба метода. Например: каковы будут оседания при остановке проходки на долгое время?! Дело в том, что эти методы либо слабо, либо вовсе не учитывают фактор времени.

2. Предлагаемый аналитический метод

Разделим общую схему оседания грунта и ведения работ на три отдельных этапа: 1) исходное состояние массива (характеризуется начальным напряженным состоянием) до проходки; 2) развитие оседания поверхности земли в процессе проходки и разработки грунта лба забоя; 3) оседание от отстающего/неполного заполнения раствором заобделочного пространства; 4) оседания, возникающие из-за податливости обделки.

Исходное состояние массива определяется действующими вертикальными и горизонтальными напряжениями, вычисляемыми по результатам инженерно-геологических изысканий. Автор предлагает использовать не дискретные значения характеристик грунтов, как принято сегодня, а вводить непрерывные аппроксимирующие функции характеристик. Так, на основании статического/динами-

ческого зондирования свойства одного типа грунта могут меняться сильно, а вводимая единственная характеристика сильно осредняет реальные свойства грунтов. При аппроксимации результатов испытаний (полиномами Лагранжа, прямыми минимального квадратичного отклонения и др.) можно перейти от модели слоистого основания с большим количеством разных характеристик к модели однослойного основания с изменяющимися характеристиками в виде некоторых непрерывных функций. Достоинство идеи в том, что непрерывные функции удобнее отдельных дискретных значений при постановке и решении аналитических задач.

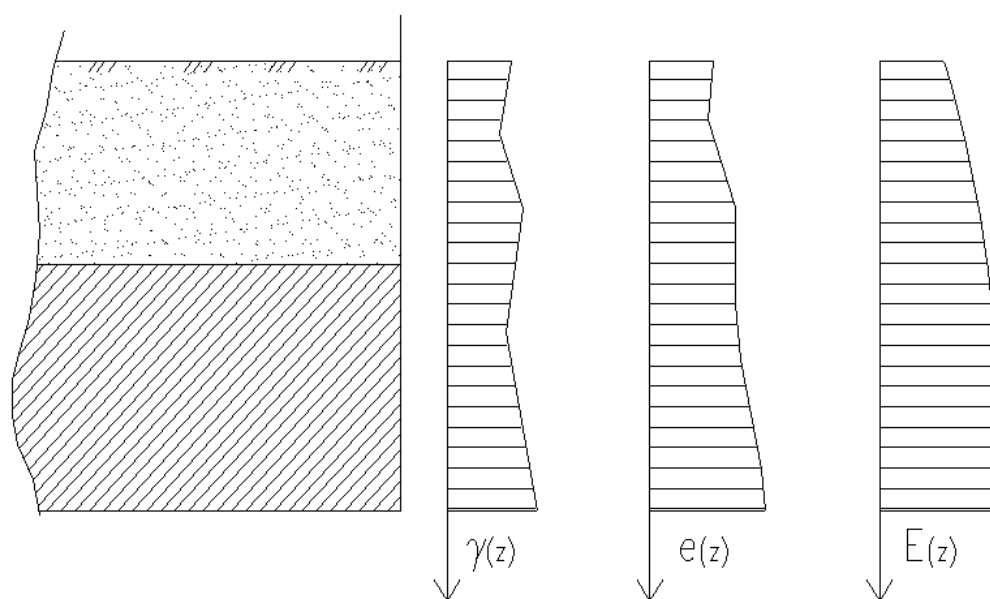


Рис. 1. Функции характеристик грунтов (графики приведены условно)

Рассмотрим процесс развития оседания в некоторой точке $(\cdot)A$ при проходке одиночного тоннеля без пригруза забоя. Сперва необходимо убедиться, что задачу можно рассматривать как статическую: по мере приближения лба забоя к $(\cdot)A$ постепенно уменьшается боковое давление и грунт разуплотняется. Столб грунта, расположенный над разуплотненной зоной, оседает вниз. Из-за внутреннего трения и при наличии сцепления оседает не отдельный столб грунта, а целый массив, принимая форму так называемой мульды оседания. При разработке грунта у $(\cdot)A$ боковое давление снижается до нуля (при отсутствии крепления лба забоя) или до некой величины, исходя из жесткости временной

крепи (при ее наличии). Таким образом, процессы, связанные с уменьшением бокового давления, протекают достаточно медленно, и расчетную схему на *рис.2* можно принять близкой к реальности.

Примем, в качестве гипотезы, такой механизм деформирования грунта на этой стадии: грунт за лбом забоя разуплотняется в связи с нулевым боковым давлением грунта со стороны тоннеля; с течением времени процесс разуплотнения нарастает, пока не достигнет некоторой предельной величины; вертикальная деформация грунта, компенсирующая разуплотнение нижележащего грунта, вызывает оседание на земной поверхности.

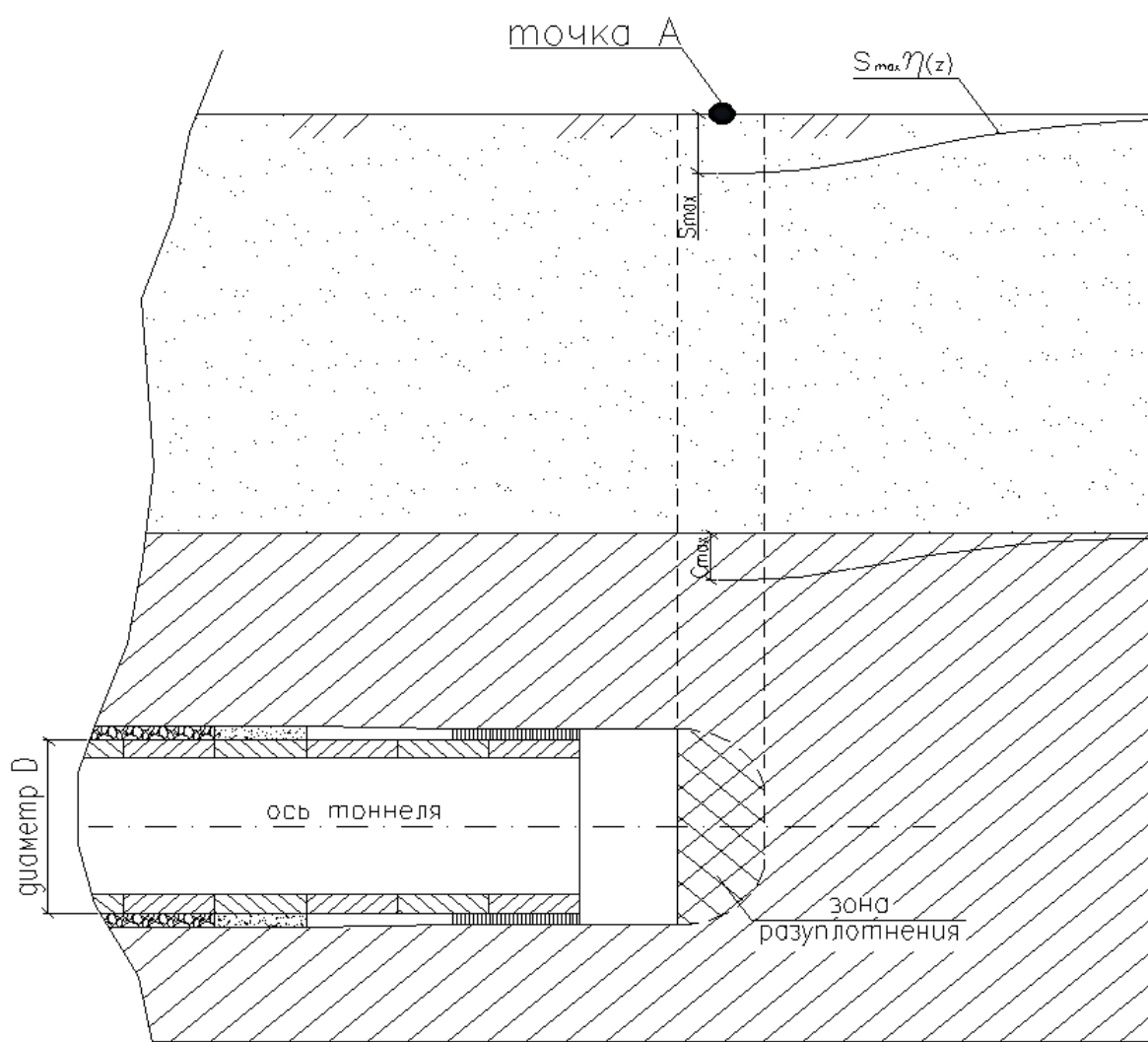


Рис. 2. Схема оседания земной поверхности;

S_{\max} – оседание на контакте прочных/слабых грунтов, $S_{\max} \eta(z)$ – оседание в уровне

При разработке грунта под очередное кольцо обделки, открытый или закреплённый лоб забоя в любом случае смещается внутрь тоннеля. Эти смещения возможно зафиксировать, составив опытные таблицы в зависимости от грунта, глубины заложения и др. На начальном этапе примем данные о разуплотнении по [1]:

$$V = F \times \delta \quad (1)$$

$$\delta = (0.5 \div 5)t \quad (2)$$

где V – объем породы, способного отделиться в процессе разуплотнения, F – площадь сечения лба забоя, δ – скорость разуплотнения грунта по [2, с. 24], t – время в сутках.

Процесс разуплотнения довольно сложен. На данном этапе разуплотнение в работе рассматривается как увеличение пористости грунта, а его распределение – равномерным по объему. Данное усреднение не совсем корректно, исходя из работ, упоминаемых в [3, с. 87]. В дальнейшем этот вопрос будет изучен, и соответствующие коррективы будут внесены.

При известных начальной пористости грунта и скорости разуплотнения получим зависимость увеличения коэффициента пористости от времени:

$$e(t) = e^0 + \frac{f(t)}{V(t)} \quad (3)$$

где $f(t)$ – объем грунта, «вылезший» внутрь тоннеля за пределы лба забоя (фиксируется теодолитной съемкой), $V(t)$ – объем разуплотнившегося грунта (см. (1)).

Далее, нехитрыми преобразованиями, найдем деформацию этого разуплотнившегося слоя грунта от веса вышележащего грунта, как:

$$s = h \times \frac{e(t) - e_1}{e_1} \quad (4)$$

где s – оседание, $e(t)$ – коэффициент пористости, возникший в процессе разуплотнения, e_1 – конечный коэффициент пористости (определяется геологическим изысканием в тоннеле после оседания).

Оседание, вычисленное по формуле (4), основано на результатах компрессионных испытаний: то есть без возможности бокового расширения грунта. В рассматриваемой задаче боковое расширение присутствует. Поэтому формула (4) имеет лишь приближенное и оценочное значение.

Выведем более точную формулу для расчета таких оседаний. Примем, что физические и механические свойства грунтов представлены не набором чисел, а непрерывными функциями (см. начало статьи). Примем, что в плотных глинах процессы разуплотнения – уплотнения происходят линейно. Тогда:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} + \frac{\nu(\sigma_x + \sigma_y)}{E} \quad (5)$$

Выражаем вертикальные и горизонтальные напряжения (плотность пока принята примерно одинаковой):

$$\sigma_z = \gamma \times z \quad (6)$$

$$\sigma_y = \lambda \sigma_z = \lambda(z) \times \gamma \times z \quad (7)$$

Подставляем выражения для напряжений в (5):

$$\varepsilon(z) = \frac{\gamma z}{E(z)} (1 - 2\nu\lambda(z)) \quad (8)$$

Далее, имея однослойное основание с характеристиками, заданными функциями, выделим элементарный бесконечно малый слой и вычислим деформацию в нем:

$$\varepsilon(z) = \frac{ds}{dz} = \frac{\gamma z}{E(z)} (1 - 2\nu\lambda(z)) \quad (9)$$

Тогда оседание вычислим интегрированием в пределах разуплотненной зоны грунта:

$$s = \int_{h_1}^{h_2} \frac{\gamma z}{E(z)} (1 - 2\nu\lambda(z)) dz \quad (10)$$

Учитывая, что у грунта есть коэффициент Пуассона и что большая часть боковой деформации придется в открытый тоннель, открытый лоб тоннеля можно учесть делением горизонтальной деформации грунта в тоннель на деформацию вертикального оседания.

Кроме того, в формуле (10) есть возможность учета пригрузки забоя, варьируя параметром λ .

Получаемое значение осадки – максимальное в сечении лба забоя. Используя зависимость.

Особняком стоит вопрос об оседании земной поверхности *при длительной остановке тоннелепроходческих работ*. Примем тот же механизм, что был применен выше: механизм разуплотнения – уплотнения. Очевидно, что бесконечно этот процесс протекать не будет (ползучесть автор пока не рассматривает). Необходимо найти предельное значение габаритов разуплотненного массива!

В твердых прочных глинах задача расчета верхнего свода может решаться методом М.М. Протоdjeяконова. При этом в своде действуют как вертикальные, так и горизонтальные напряжения. Решение сводится к проверке сводообразования. Повернем плоскость на 90 градусов и представим образование самонесущего свода в горизонтальной плоскости: на свод действуют напряжения σ_x и σ_y , а поперек свода – σ_z .

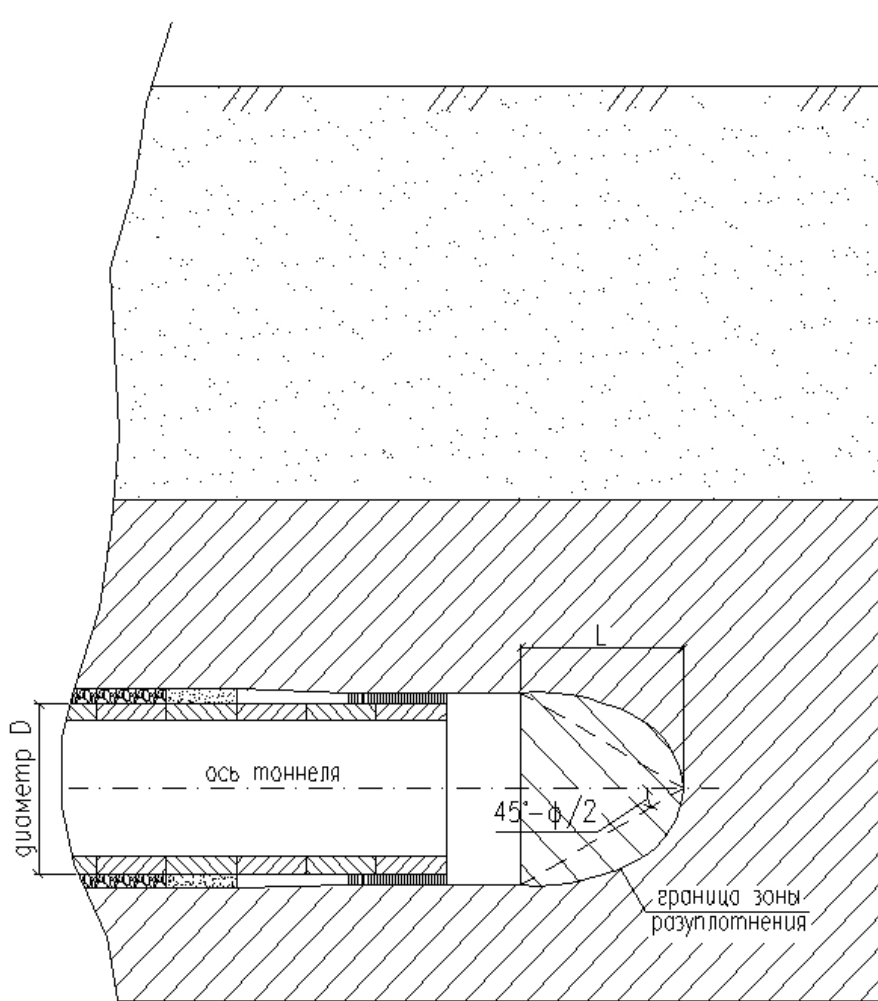


Рис. 3. Схема развития предельной зоны разуплотнения

Тогда граничное положение зоны разуплотненного массива получим в виде:

$$L = R \times \operatorname{ctg}(45 - \varphi/2) \quad (11)$$

где R – радиус лба забоя.

Из выражения (11) следует, что зона разуплотнения при остановке проходки тоннеля больше, чем при нормальной скорости проходки. Поэтому оседания произойдут на значительно большей наземной территории.

Проверим результаты на адекватность. Горизонтальные напряжения на глубине в 40...60 метров составит примерно 0,4...0,6 МПа. В уровне лба забоя горизонтальные напряжения нулевые, то есть произошло снятие напряжений на 0,4...0,6 МПа. Из многочисленной литературы, автор нашел немного материала об изучении разуплотнения грунта. В книге [3, с. 87] со ссылкой на [1] приведены данные об измерении габаритов зон разуплотнения при разборке зданий. При *сравнительно* похожих ситуациях из опытов Н.И. Калмыковой и Ф.Г. Габдрахманова следует, что при снятии давления в 0,6 МПа зона разуплотнения развивалась до глубины в 5 метров. В нашем случае, размер разуплотненного массива составит (при $\varphi \approx 30^\circ$ и $D = 7$ м) 6,1 метр. То есть результаты похожи.

Список литературы

1. Габдрахманов Ф.Г. Исследование напряженно-деформированного состояния при откопке котлованов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЛИСИ. – Л., 1990. – 24 с.
2. Протосеня А.Г. Механика подземных сооружений. Пространственные модели и мониторинг [Текст] / А.Г. Протосеня [и др.]. – СПб.: СПГГУ-МАНЭБ, 2011. – 355 с.
3. Улицкий В.М. Геотехническое сопровождение реконструкции городов / В.М. Улицкий, А.Г. Шашкин. – М.: Изд-во АСВ, 1999.