

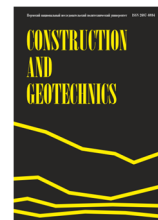


пермский
политех

CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 16, № 1, 2025

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2025.1.04

УДК 624.195

ОБЗОР ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ОСАДОК ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА ПРИ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКЕ

А.З. Тер-Мартirosян, И.А. Тихонюк

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 10 сентября 2024
Одобрена: 22 декабря 2024
Принята к публикации:
05 марта 2025

Ключевые слова:

тоннели, тоннелепроходческие работы, щитовая проходка, аналитические методы осадок, эмпирические методы осадок, численные методы осадок, геотехническое моделирование, зона влияния, осадка земной поверхности, осадка сооружения, потеря грунта, коэффициент перебора грунта, мониторинг, дисперсный грунт.

АННОТАЦИЯ

Хорошо известно, что тоннелепроходческие работы щитовым методом зачастую вызывают деформации в массиве грунта и на поверхности. Как следствие, потенциальный ущерб от тоннелепроходческих работ вышележащим сооружениям в зоне влияния зависит от ряда факторов, а именно: грунтового массива и его характеристик, технических и технологических особенностей тоннеля и тоннелепроходческого оборудования. И именно численные методы позволяют наиболее достоверно моделировать условия проходки, близкие к реальным. Целью работы является обзорный и сравнительный анализ методов различных авторов определения осадок и вычисления коэффициента перебора грунта (объема «потери грунта» – volume loss) V_L , анализ предоставляемых данных, в том числе полевых, а также определение возможности их совершенствования.

С помощью комплексного сравнительного и контент-анализа различных подходов к определению осадок земной поверхности и коэффициента перебора грунта V_L тоннелепроходческих работ в работе представлены основные виды численных методов расчета осадок дневной поверхности и коэффициента перебора грунта V_L в хронологическом порядке их появления.

Проведенный анализ множества численных методов, примеров значений осадок земной поверхности и коэффициента перебора грунта V_L из источников различных лет обеспечивает более широкий обзор результатов тоннелепроходческих работ. Приводятся результаты наиболее значимых исследований. Анализируются и поясняются некоторые подходы к формированию теорий наиболее интересных и цитируемых исследований.

Поскольку осадка земной поверхности и, соответственно, вышележащих сооружений определяет наличие или отсутствие мероприятий по снижению влияния на них или защиты, корректное их определение позволяет уменьшить стоимость строительства при тоннелепроходческих работах в зоне влияния. Соответственно существует дальнейшая необходимость развития этого геотехнического направления численными методами в поисках оптимальных и качественных решений для определения осадок от тоннелепроходческих работ и вычисления коэффициента перебора грунта V_L , а также по возможному усовершенствованию нормативной документации в данной области.

© Тер-Мартirosян Армен Завенович – доктор технических наук, профессор, e-mail: gic-mgsu@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8787-826X, ResearcherID: Q-8635-2017.

Тихонюк Иван Александрович – аспирант, e-mail: itikhonyuk@gmail.com, ORCID: 0009-0007-4841-3276.

Armen Z. Ter-Martirosyan – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: gic-mgsu@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8787-826X, ResearcherID: Q-8635-2017.

Ivan A. Tikhoniuk – Postgraduate Student, e-mail: itikhonyuk@gmail.com, ORCID: 0009-0007-4841-3276.

OVERVIEW NUMERICAL METHODS FOR CALCULATING THE SETTLEMENTS OF THE SOIL SURFACE DURING OF TUNNELING

A.Z. Ter-Martirosyan, I.A. Tikhoniuk

Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 10 September 2024
Approved: 22 December 2024
Accepted for publication:
05 March 2025

Keywords:

tunnels, tunneling, shield sinking, numerical methods of settlement, geotechnical modeling, zone of influence, settlements of earth's surface, structures settlement, volume loss of soil, excess excavation ratio, volume loss, monitoring, dispersed soil.

ABSTRACT

It is well known that tunneling using the shield method often causes deformations in the soil mass and on the surface. As a result, the potential damage from tunneling operations to overlying structures in the zone of influence depends on a number of factors, namely: the soil mass and its characteristics, technical and technological features of the tunnel and tunneling machine. And it is numerical methods that make it possible to most reliably simulate the conditions of tunneling close to real ones. The purpose of the work is a review and comparative analysis of the methods of various authors for determining settlements and calculating the excess excavation ratio (volume loss) V_L , analysis of the data provided, including field data, as well as determining the possibility of their improvement.

With the help of a comprehensive comparative and content analysis of various approaches to determining the settlements of the earth's surface and the excess excavation ratio (volume loss) V_L of tunneling operations, the paper presents the main types of numerical methods for calculating the settlements of the earth's surface and the excess excavation ratio (volume loss) V_L in chronological order of their occurrence.

The analysis of a variety of numerical methods, examples of values of settlements of the earth's surface and the excess excavation ratio (volume loss) V_L from sources of various years, provides a broader overview of the results of tunneling operations. The results of the most significant studies are presented. Some approaches to the formation of theories of the most interesting and cited studies are analyzed and explained.

Since the settlements of the earth's surface and, accordingly, the overlying structures determines the presence or absence of measures to reduce the impact on them or protection, their correct definition allows you to reduce the cost of construction during tunneling in the zone of influence. Accordingly, there is a further need to develop this geotechnical direction using numerical methods in search of optimal and high-quality solutions for determining settlements from tunneling operations and calculating the excess excavation ratio (volume loss) V_L , as well as for possible improvement of regulatory documentation in this area.

Введение

Хорошо известно, что деформации от проходок тоннелей щитовым методом и, как следствие, потенциальный ущерб от них подземным инженерным коммуникациям, сооружениям и вышележащим зданиям в зоне влияния будут зависеть от многих факторов условий проходки: грунтового массива и его характеристик, технических и технологических особенностей тоннеля и тоннелепроходческого оборудования.

В обзорном исследовании авторов [1] по аналитическим и эмпирическим методам оценки осадок дневной поверхности и сооружений в зоне предварительного влияния при тоннелепроходческих работах была собрана информация по открытым и наиболее цитируемым работам в данной области геотехники начиная с середины XX в. Было отмечено, что исследования с течением времени претерпели множественные и существенные изменения, благодаря последовательному анализу теоретических исследований и натурных данных большим количеством исследователей. Соответственно можно отметить, что деформации земной поверхности, зданий, сооружений и инженерных коммуникаций в зоне влияния при сооружении тоннелей щитовыми методами с разной степенью точности можно прогнозировать следующими группами методов:

- Первая группа – *аналитические методы*, основанные на решении краевых задач геомеханики с применением теории математического анализа.
- Вторая группа – *эмпирические методы*, основанные на инструментальном наблюдении за перемещениями конструкций и земной поверхности с последующей статистической обработкой полученных данных и применением подходов из группы аналитических методов.
- Третья группа – *численные методы*, включающие применение численных решений краевых задач в сплошных средах для изменения напряженно-деформированного состояния (далее – НДС), с использованием программ методов конечно-элементного (далее – МКЭ (*FEM-analysis*)) и конечно-разностного (далее – МКР (*FDM-analysis*)) анализа, используя эмпирические формулы определения коэффициента перебора грунта («потери объема» – *volume loss*) или моделирования фактического зазора (*gap method*). Указанные методы реализованы в таких программных комплексах, как Plaxis, Midas, ZSoil, Rocscience (МКЭ), FLAC (МКР) и т.д.

Последовательность групп методов выстроена в соответствии с хронологическим порядком исследования в данной области, обусловленной началом массового строительства подземных тоннелей в середине XX в., в первую очередь механизированными способами. Мощности современных ЭВМ и многообразие программных комплексов МКЭ и МКР расчетов сделали численные методы наиболее передовыми при определении НДС грунтовых массивов. Однако эмпирические и даже аналитические методы не потеряли своей актуальности у исследователей и по сей день и могут применяться для экспресс-анализа оптимальных параметров трасс закрытых щитовых проходок и т.д.

И все же большинство исследователей для определения характеристик прогнозного значения осадок и предотвращения аварийных ситуаций при проходке тоннелепроходческим механизированным комплексом (далее – ТПМК) или микротоннелепроходческим механизированным комплексом (далее – МТПК) выполняют геотехнический прогноз (оценку) влияния проходок численными методами с помощью МКЭ, реже МКР, программ. Учитывая регулярные публикации работ эмпирических и численных методов по определению значений осадок поверхности с большим акцентом последних работ на коэффициент перебора грунта V_L , можно сделать вывод, что актуальность данной темы не угасает и продиктована сложившейся высокой плотностью современных городов, где рост тоннельных проходок будет увеличиваться за счет развития транспортной инфраструктуры и прокладки инженерных сетей. Тем важнее консолидировать и актуализировать имеющиеся данные и многолетний опыт для проведения исследовательской деятельности, направленной на повышение точности прогнозов определения значений осадок поверхности и вычисления коэффициента перебора грунта V_L .

Целью настоящей работы является обзорный сравнительный анализ численных методов, определение возможности их совершенствования при прогнозировании осадок поверхности, зданий, сооружений, инженерных коммуникаций и вычисление коэффициента перебора V_L , а также сопоставительный анализ предоставляемых данных и результатов, в том числе полевых.

Численные методы расчетов осадок в отличие от аналитических и эмпирических, способны учитывать куда более сложные условия выполнения тоннелепроходческих работ, такие как неоднородные и сложно пересеченные грунтовые условия, учет расчетных случаев с поэтапной последовательностью выполнения работ («остановка» ротора щита,

учет деформаций массива грунта впереди забоя, покольцевая и поблочная установка элементов тоннеля, моделирование аварийных ситуаций и т.д.), индивидуальные особенности фундаментов и конструктивные формы сооружений, в том числе подземных, построение моделей в трехмерной постановке с изменяемыми по трассе тоннеля вышесказанными условиями и особенностями и т.д. Соответственно численные методы преодолевают ограничения эмпирических методов и, следовательно, аналитических методов с помощью МКЭ и МКР анализа, которые нашли широкое применение с конца 70-х гг. XX в. и используются в том числе для тоннелепроходческих работ и на сегодняшний день.

Одним из первых численных методов определения осадки земной поверхности был предложен метод определения параметра зазора R.K. Rowe и G.J. Kack [2] для расчета упругопластических деформаций грунтового массива, вызванных проходкой ТПМК/МТПК с устройством постоянной сборной обделки в глинистом грунте. Выполнялось моделирование параметра зазора – *gap* (рис. 1), представляющего собой физический зазор между фактическим диаметром тоннеля и наружным диаметром (диаметром резания) ТПМК/МТПК и полностью отсутствующего в лотке тоннеля. Позже К.М. Лее и соавторы [3, 4] также исследовали параметр зазора (*gap method*) уже в трехмерной упругопластической постановке МКЭ для тоннелей мелкого заложения. Учитывая, что численный анализ методом зазора явился прародителем современного понятия коэффициента перебора грунта (V_L), авторы также предложили зависимость для его определения:

$$V_L = \frac{g}{R} \cdot 100 = \frac{G_{AP} + U_{3D} + \omega}{R} \cdot 100, \quad (1)$$

где g – параметр зазора; G_{AP} – физический зазор; U_{3D} – трехмерная упругопластическая деформация в забое тоннеля; ω – зазор из-за перерезания борта; R – радиус закрытой выработки.

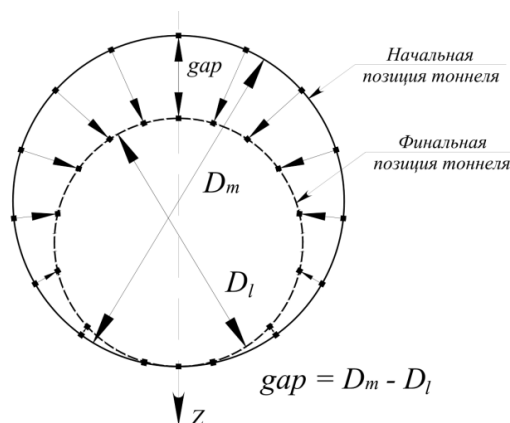


Рис. 1. Метод моделирования зазора (*gap method*) при механизированных тоннелепроходческих работах R.K. Rowe, G.J. Kack [2]

Fig. 1. The gap method, developed by R.K. Rowe, G.J. Kack [2]

Позже N. Loganathan и H.G. Poulos [5] модернизировали зависимость К.М. Лее и др. [4] на основании большого анализа натурных данных:

$$V_L = \frac{\pi \left(R + \frac{g}{2} \right)^2 - \pi R^2}{\pi R^2} \cdot 100 = \frac{4gR + g^2}{4R^2} \cdot 100. \quad (2)$$

Еще раньше М. Panet и А. Guenot [6] предложили метод сближения-удержания (*convergence-confinement method*), который представляет собой моделирование снятия напряжений в процессе между выемкой грунта и установкой постоянной обделки, заменяя пропорцию разгрузки на эквивалентные узловые усилия на границе тоннеля, представляющие собой давление грунта выемки. В этом методе перед установкой постоянной обделки в узлах на границах выработки снижаются начальные напряжения в грунте $\{\sigma_0\}$ на коэффициент $(1 - \lambda)$, где λ постепенно увеличивается от нуля до единицы. Напряжение в постоянной обделке обозначается заданным значением λ_D , соответствующим ее установке.

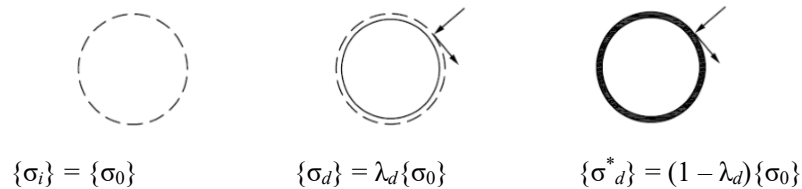


Рис. 2. Метод сближения-удержания при механизированных тоннелепроходческих работах М. Panet и А. Guenot [6]

Fig. 2. Convergence-confinement method for mechanized tunneling operations by M. Panet и A. Guenot [6]

Г. Swoboda [7] и Г. Swoboda и др. [8] разработали метод, названный методом прогрессивного размягчения, для моделирования тоннельных проходок по ново-австрийскому тоннельному методу (NATM), который делится на два различных подхода – β -метод и α -метод (рис. 3).

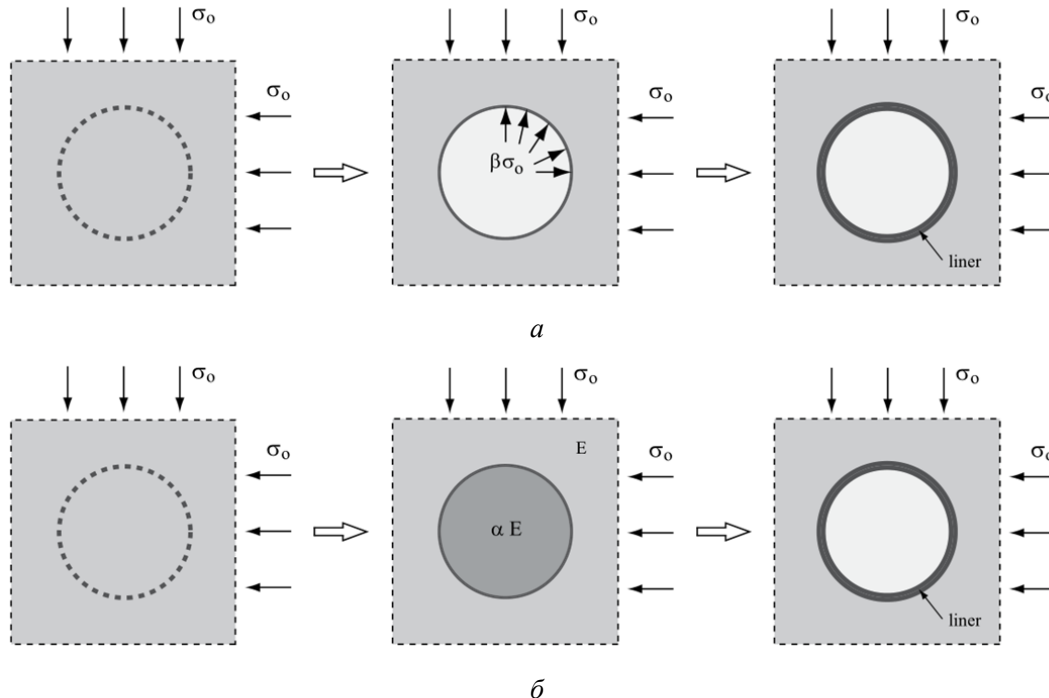


Рис. 3. Ново-австрийский тоннельный метод: *a* – β -метод, или метод уменьшения напряжений; *б* – α -метод, или метод уменьшения жесткости по Г. Swoboda [7] и Г. Swoboda и др. [8]

Fig. 3. New Austrian Tunneling Method: *a* – β -method, or stress comparison method; *б* – α -method, or stress comparison method according to G. Svoboda [7] and G. Svoboda et al. [8]

В β -методе (рис. 3, а) напряжение в забое «размягчается» путем умножения на коэффициент β и прикладывания к периметру тоннеля, где σ_0 – начальное НДС, а $0 < \beta < 1$ – коэффициент уменьшения напряжений. S.C. Möller [9] указывает стандартное значение $\beta = 0,5$, но оно может варьироваться от 0,2 до 0,8, и отмечает, что значения β сильно зависят от метода строительства, жесткости и типа модели грунта, коэффициента бокового давления J. Jáky [10] K_0 , длины открытой части забоя тоннеля. Этот метод, пожалуй, наиболее часто используется на практике. В α -методе (рис. 3, б) последовательность расчетов идентична β -методу, но в данном методе жесткость извлекаемого грунта выработки снижается по условию αE , где $0 < \alpha < 1$ – коэффициент уменьшения жесткости, E – модуль Юнга (общей деформации) грунта. S.C. Möller [9] указывает типовые значения в диапазоне от 0,2 до 0,5. Для выполнения расчетов также, как и в случае с β -методом, необходимо задаться величиной α .

Л.А. Строкова [11] в своей работе по исследованию осадок поверхности при проходке тоннеля щитовым способом при строительстве линии метрополитена U-8-Nord г. Мюнхена моделирует стадии извлечения грунта и установки обделки тоннеля и сравнивает две методики: β -метод ($\beta = 0,4; 0,5; 0,6$ и $0,7$) и *volume loss* ($V_L = 0,2; 0,4$ и $0,6\%$). Анализируя данные, делает вывод, что различие указанных способов при определении осадки грунта поверхности обоих методов незначительно. X. Bian и др. [12] использовали β -метод при проходке ТПМК в шанхайской слабой глине как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе, с помощью плоских МКЭ расчетных схем.

М. Karakus [13]; D.M. Potts и L. Zdravković [14] (рис. 4) использовали метод контроля «потери объема». Как и при методе сближения-удержания, «потеря объема» определяется по завершении земляных работ и заменяет пропорцию разгрузки, где $\{F_0\}$ – эквивалентные узловые усилия давления на границе тоннеля от грунта, подлежащего извлечению. На каждой итерации отслеживается потеря объема грунта и, когда достигается требуемое значение потери объема, устанавливается постоянная обделка тоннеля.

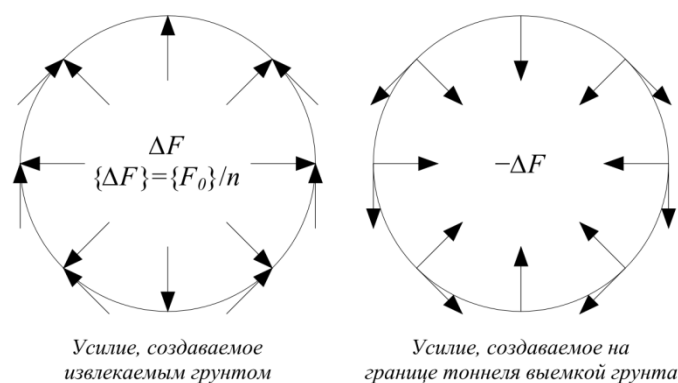


Рис. 4. Моделирование выемки твердого элемента по М. Karakus [13]

Fig. 4. Modeling of the excavation of a solid element according to M. Karakus [13]

Исследования С. Gonzalez и С. Sagaseta [15]; A.J. Whittle и др. [16] и A.J. Whittle и С. Sagaseta [17] объединили аналитический метод (рис. 5) с численным моделированием для прогнозирования деформации грунта тоннелей мелкого заложения в нелинейных, неупругих слабых грунтах. Однако полученные результаты дают лишь начальное представление о нелинейно-неупругом поведении грунта. Кроме того, три фазы независимых деформаций контура закрытой выработки основаны на упрощенном предположении о ли-

нейном поведении материала. В работах A.J. Whittle и др. [16] и E.S. Ieronymaki и др. [18] использовались плоские МКЭ расчетные схемы для моделирования проходок двух ТПМК в условиях лондонской полутвердой глины. Авторы делают вывод, что аналитические решения основаны на точечной сходимости для линейно-упругого полупространства и имеют ограничение по оптимизации только двух независимых форм деформации тоннеля – u_ϵ и u_δ , в то время как численные решения учитывают три вида формы – u_ϵ , u_δ и Δu_y – и не имеют ограничений по литологическому напластованию или конкретным грунтовыми моделям. Исследователями метода отмечается, что преобладающим типом формы для тоннелей является равномерное схождение (u_ϵ) с гораздо меньшей овализацией (u_δ). Исследования E.S. Ieronymaki и др. [18] также подтверждают выводы E. Leca и B. New [19], что значительные вертикальные деформации грунта перед забоем ТПМК, обусловленные разрыхлением грунта, компенсирует тенденцию ТПМК к погружению вниз.

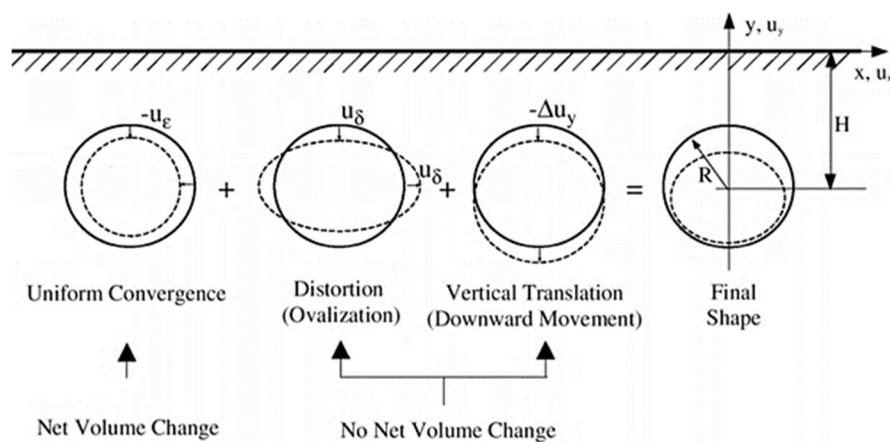


Рис. 5. Фазы деформирования тоннельной обделки для тоннеля мелкого заложения в соответствии с C. Gonzalez и C. Sagaseta [15] и A.J. Whittle и др. [16]

Fig. 5. Deformation phases of tunnel lining for shallow-laying tunnel according to C. Gonzalez & C. Sagaseta [15] and A.J. Whittle et al. [16]

S.R. Macklin [20] предложил линейную регрессию коэффициента нагрузки в забое LF с коэффициентом перебора грунта V_L при определенном коэффициенте нагрузки в забое LF и соотношении $C/D > 1$. Границы были основаны на визуальной оценке разброса данных вокруг линии линейной регрессии анализа различных данных исследователей, заданной уравнением

$$V_L = 0,23e^{4,4LF} \% \text{ для } 0,2 \leq LF \leq 1,0. \quad (3)$$

Исследованиями с численным моделированием, в том числе с нелинейными моделями грунта, занимались также Simpson и др. [21]; D.M. Potts и A. Addenbrooke [22]; Q.M. Gong и S.H. Zhou [23]; H.J. Zhang и др. [24]; Y. Zhao и др. [25]; H. Chakeri и B. Ünver [26] применили трехмерную МКР-модель, чтобы получить новое эмпирическое уравнение для определения деформации поверхности грунта, отмечая достаточно хорошую точность нового уравнения с результатами полевых данных реализованных проектов тоннельных проходок.

В отечественной практике М.М. Тупиков [27] занимался преимущественно эмпирическими методами щитовых проходок коммуникационных тоннелей, но использовал и численные методы для сверки полученных эмпирических формул в ПК Plaxis и выстроил

совокупность графиков осадки поверхности, относительной неравномерности осадок, кривизны поверхности, горизонтальных перемещений поверхности для семи характерных типов инженерно-геологических разрезов в г. Москве. О.Н. Исаев и др. [28] выделяют особую важность мультивариативных параметров, таких как: математическая модель грунта, размеры расчетной области, дискретность расчетной сетки. Кроме того, отмечается, что упругая модель грунта дает более низкие осадки, чем упругопластическая модель Кулона – Мора, а упругопластическая модель с изотропным упрочнением показывает самые высокие значения. Еще авторы отмечают увеличение вертикальных перемещений массива для суглинистых грунтов больше, чем для песка, при увеличении дискретности сетки. Уже в работе О.Н. Исаева, Р.Ф. Шарафутдинова [29] и В.П. Петрухина и др. [30] по исследованию проходок коммуникационных тоннелей больших диаметров отмечено, что наибольшим образом коэффициент перебора грунта V_L зависит от типа ТПМК и вида грунта непосредственно в забое щита.

Т. Gong и др. [31] исследовали проходку метро ТПМК (EPBM) Ø10,50 м с использованием объемной МКЭ-модели по трем основным фазам (этапам) деформации грунта от ТПМК: перебора по лобовой части (*face loss*); перебора вдоль по длине оболочки щита (*shield void loss*); перебора в хвостовой части оболочки щита (*tail void loss*). Процентное соотношение каждого из этапов составило 32, 45 и 23 % соответственно. Наибольшее исследование трех этапов деформирования грунта от ТПМК проводил N. Loganathan [32], а M.N. Vu и др. [33] использовали 4 этапа для определения коэффициента перебора грунта, составляющих суммарный коэффициент перебора V_L :

- формула N. Loganathan [32] (рис. 6, а):

$$V_L = V_f + V_s + V_t, \quad (4)$$

V_f – коэффициент перебора по лобовой части (*face loss*) ТПМК; V_s – коэффициент перебора вдоль по длине оболочки щита (*shield void loss*) ТПМК; V_t – коэффициент перебора в хвостовой части оболочки щита (*tail void loss*) ТПМК (после сползания с обделки тоннеля);

- формула M.N. Vu и др. [33] и H.Z. Cheng и др. [34] (рис. 6, б):

$$V_L = V_{L,f} + V_{L,s} + V_{L,t} + V_{L,c}, \quad (5)$$

где $V_{L,f}$, $V_{L,s}$, $V_{L,t}$ – то же, что по N. Loganathan [32]; $V_{L,c}$ – коэффициент перебора после выполнения проходки (*consolidate void loss*) ТПМК (консолидационная составляющая).

N. Loganathan [32] в своей монографии использует исследования таких авторов, как R.B. Peck [35]; Т. Нануа [36]; коэффициент устойчивости забоя по В.В. Broms и Н. Bennermark [37]; радиальная деформация грунта по направлению к обделке К.М. Lee и др. [4] легла в основу компонента V_f ; исследования зависимости напряжений вокруг тоннеля от радиального перемещения грунта в зазор по А. Bezuijen [38] основывают компонент V_s ; В. Lagerblad и др. [39] и O.G. Ingles [40], а также собственные исследования в опубликованных статьях Loganathan N. и др. [41]; N. Loganathan и R.F. Flanagan [42] и N. Loganathan и др. [43] сформировали компонент V_t .

M.N. Vu и др. [33] в своей монографии используют исследования таких авторов как: В.В. Broms и Н. Bennermark [37]; R.J. Mair и др. [44]; R.J. Mair и др. [45]; P.B. Attewell и др. [46]; M.P. O'Reilly [47]; R.J. Mair [48]; А. Mori и др. [49]; S. Jancsecz и W. Steiner [50]; R.J. Mair и R.N. Taylor [51]; S.R. Macklin [20]; P.S. Dimmock и R.J. Mair [52]; M.N. Vu и др. [53] в части определения устойчивости забоя, определяющей исследовательскую базу для

ная новизна их исследования заключается в новом уравнении компонента $V_{L,c}$ (консолидационная составляющая) в виде

$$V_{L,c} = 0,26V_l - 0,04, \quad (7)$$

где V_l варьируется от 0,05 до 0,97 %.

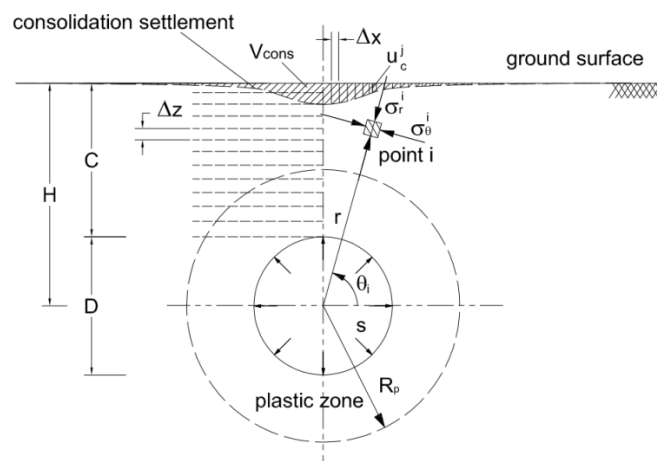


Рис. 7. Послойное деление грунтов для расчета консолидации после проходки ТПМК по М.Н. Ву и др. [33]

Fig. 7. Layer-by-layer division of soils for calculating consolidation after tunneling of TBM according to M.N. Vu et al. [33]

В качестве заключения Н.З. Cheng и др. [34] указывают свой анализ данных по суммарному вкладу компонентов (стадий) коэффициента перебора грунта в итоговую осадку:

I стадия – $V_{L,f}$: 15–25 % перед забоем (*face loss*) ТПМК;

II стадия – $V_{L,s}$: 35–45 % вдоль оболочки (*shield void loss*) ТПМК;

III стадия – $V_{L,t}$: 25–35 % в хвосте (*tail void loss*) ТПМК;

IV стадия – $V_{L,c}$: 5–15 % после выполнения проходки (*consolidate void loss*) ТПМК (консолидационная составляющая).

В исследовании W. Bogusz [61] консолидируются данные различных авторов в части суммарного вклада компонентов (стадий) коэффициента перебора грунта V_L в итоговую осадку, которая дополнена в настоящей статье.

В работах А.З. Тер-Мартirosяна и др. [68–71] получен коэффициент перебора грунта V_L при проходках ТПМК тоннелей метро методом «обратной» задачи на основе данных результатов геодезического мониторинга с помощью численных методов в плоской и объемной постановке в ПК Plaxis. Были получены фактические значения коэффициента перебора грунта V_L при среднем диаметре тоннелей Ø10,5 м для различных грунтовых условий в г. Москве, которые варьируются в диапазоне от 0,10 до 1,30 %, а для тоннелей Ø6,6 м от 0,54 до 1,20 %. И были сделаны выводы, что в плоской и объемной постановке модели может быть разброс значений до 2 раз, но при этом с действующей нормативно-технической документацией РФ (табл. Ж.1 СП 249.1325800.2016), учитываемой при проведении проектных работ, разница составляет в 2–25 раза. По выдвинутой гипотезе в работе И.А. Тихонюка и Ю.В. Филатова [72] получен коэффициент перебора грунта V_L при проходке ТПМК под конкретным сооружением, близкий с работой А.З. Тер-Мартirosяна и др. [69]. R.F. Sharafutdinov и др. [73], анализируя обширное применение численных моделей, отмечают некоторую неопределенность результатов численных методов.

Таблица 1

Сводная таблица значений влияния коэффициента перебора грунта (V_L) и их процентное соотношение по продольному профилю осадки по мере продвижения ТПМК

Table 1

Summary table of the values of the effect of the volume loss (V_L) and their % ratio along the longitudinal profile of settlements as the TBM progresses

Автор(ы)	Тип ТПМК и Ø, м	Тип грунта	Примерный перебор грунта вокруг ТПМК от общего V_L , %					Консо- лида- ция
			забой	обо- лочка	хвос- товая часть	обделка	нагнета- ние рас- твора	
T. Nomoto и др. [62]	ЕВРМ ~Ø4,69	Связные аллюви- альные грунты	11 %	42 %			47 %	
		Связные аллюви- альные грунты	3 %	91 %			6 %	
S. Kanayasu и др. [63]	ЕВРМ ~Ø8,6	Пески и гравии	34 %	38 %		28 %		—
Z.C. Moh и др. [64]	ЕВРМ ~Ø6,0	Пластичная или- стая глина	39 %		32 %			29 %
D. Simic и G. Gittoes [65]	ЕВРМ Ø9,71	Пески поверх илистых глин и мергелей	0 %	100 %				—
A.A. Ata [66]	SBPM Ø9,48	Пески и выше глина	25–30 %	70–75 %				—
C.-Y. Ou и др. [67]	ЕВРМ ~Ø6,05	Илистые глина и пески	10 %	75 %				15 %
T. Gong и др. [31]	ЕВРМ Ø10,5	Пластичные глины	32 %	45 %	23 %			
H.Z. Cheng и др. [34]	ЕВРМ Ø10,22	Илистая глина	15–25 %	35–45 %	25–35 %			5–15 %

Так, например, авторы выделяют работы исследователей F. Aldiarnar и др. [74]; S. Çelik [75]; V.P. Petrukhin и др. [76, 77], чьи результаты показывают, что модели упрочняющегося грунта (далее – HS) и упрочняющегося грунта с малой деформационной жесткостью (далее – HSS) выдают значения осадок поверхности и дополнительных осадок сооружений в 1,3÷2,3 раза больше относительно получаемых данных геодезического мониторинга. Авторы указывают на то, что тоннелепроходческие работы закрытым способом должны решаться с использованием проверенных моделей и подходов, и особо отмечают, что идеальная упругопластическая модель грунта Мора – Кулона (далее – MC) дает более адекватную осадку поверхности, чем HS.

Методы и методология

Следует отметить образовавшийся дисбаланс между количеством публикаций на основе решения задач численными методами, которые имеют неполный анализ результатов, и теми, которые несут в себе анализ и сравнение аналитических и эмпирических методов. Разнообразие исследований имеет важное значение, особенно для большего понимания вычисления коэффициента перебора грунта V_L . В данной работе делается попытка комплексного сравнительного и контент-анализа различных подходов к определению осадок

земной поверхности и коэффициента перебора грунта (объема «потери грунта» – *volume loss*) V_L при производстве тоннелепроходческих работ, что и составляет принятый метод исследования.

Работа содержит основную классификацию численных методов расчета осадок дневной поверхности и коэффициента перебора грунта (объема «потери грунта» – *volume loss*) V_L . Проводится историческая выборка численных методов в хронологическом порядке появления. Выполнен анализ множества конкретных примеров значений осадок земной поверхности и коэффициента перебора грунта V_L . При таком подходе рассмотрено множество источников различных лет, чтобы обеспечить более широкий обзор данных, полученных при производстве тоннелепроходческих работ. Результаты наиболее значимых исследований анализируются в следующем разделе. Наконец, предлагаются обсуждение и выводы, главным образом относительно цели и фокуса будущих усилий по исследованию методов определения коэффициента перебора грунта V_L и возможному усовершенствованию нормативной документации.

Результаты

Описанные в первом разделе различные методики численных методов по определению осадок отличаются возможностью учитывать множество факторов, приближенных к реальным условиям тоннелепроходческих работ, таких как учет сложных геологических условий (негоризонтального напластования, гидрогеологических условий, физико-механических характеристик грунтов массива), учет реальной пространственной жесткости сооружений и их текущее техническое состояние, а также наличие дефектов и т.д., что обеспечивает предельно корректный учет прогнозных значений результатов расчетов.

В актуальной тематике численных методов оценки дополнительных осадок поверхности грунта, зданий, сооружений и инженерных коммуникаций становится важным определение коэффициента перебора грунта (V_L – *volume loss*) на основании эмпирических данных и методов. В табл. 2 собраны формулы определения V_L различных наиболее цитируемых исследователей.

Таблица 2

Сводная таблица значений определения коэффициента
перебора грунта (V_L) различных исследователей

Table 2

Summary table of values for determining the volume loss (V_L) of various researchers

Автор(ы)	Формула V_L , %	Комментарии
N.H. Glossop [78]	$V_L = 1,33N - 1,4$	N – коэффициент устойчивости забоя по В.В. Бромс и Н. Беннермарк [37]. Применимо для $1,5 < N < 4$
G.W. Clough и B. Schmidt [79]	$V_L = m \cdot e^{(N-1)}$ для $N \geq 1$ $V_L = m \cdot N$ для $N < 1$	m – коэффициент зависящий от типов грунтов от 0,1 до 0,3, указанный диапазон корректен для $500 \leq E_u/c_u \leq 1500$; E_u – недренированный модуль деформации грунта, кПа. c_u – прочность на сдвиг в недренированном состоянии, кПа. Точки данных анализа демонстрируют большой разброс как для переуплотненных, так и для нормально уплотненных глин

Окончание табл. 2

Автор(ы)	Формула V_L , %	Комментарии
R.J. Mitchell [80]	$V_L = \frac{c_u}{E_u} \cdot e^{(0,5N)}$	Корректный диапазон $200 \leq E_u/c_u \leq 700$, а также при «плохом качестве изготовления» образца, V_L следует увеличить в 3 раза. E_u и c_u – то же, что по G.W. Clough и B. Schmidt [79]
A.O. Uriel и С. Sagaseta [81]	$V_L = m \cdot e^{\left(3N \frac{D}{z_0}\right)}$	Используется соотношение E_u/c_u , равное 400. m , E_u и c_u – то же, что по G.W. Clough и B. Schmidt [79]
E. Leca [82]	$V_L = \frac{m \cdot e^{(N-1)}}{1 + \left(\frac{m}{100}\right) e^{(N-1)}}$ $N = \frac{\sigma_S + \gamma z_0 - \sigma_T}{c_u} \quad 0,2\% \leq m \leq 0,6\%$ $100 \cdot \frac{0,0022 N_{\phi'}}{1 + 0,0022 N_{\phi'}} \leq V_L \leq \frac{0,0192 N_{\phi'}}{1 + 0,0192 N_{\phi'}} \cdot 100$ $N_{\phi'} = (1 - \sin \phi') \frac{\sigma_S + \gamma z_0}{\sigma_T}$	N – то же, что по N.H. Glossop [78]; m – то же, что по G.W. Clough и B. Schmidt [79]; ϕ' – угол внутреннего трения
E. Arioglu [83]	$V_L = 0,343 N^{1,88}$	То же, что по N.H. Glossop [78] с дополнением по G.W. Clough и B. Schmidt [79] при вычислении N
К.М. Lee и др. (1992) [4]	$V_L = \frac{g}{R} \cdot 100 = \frac{G_{AP} + U_{3D} + \omega}{R} \cdot 100$	g – параметр зазора; G_{AP} – физический зазор; U_{3D} – трехмерная упругопластическая деформация в забое тоннеля; ω – зазор из-за перерезания борта; R – радиус закрытой выработки
N. Loganathan и H.G. Poulos [5]	$V_L = \frac{\pi \left(R + \frac{g}{2}\right)^2 - \pi R^2}{\pi R^2} \cdot 100 = \frac{4gR + g^2}{4R^2} \cdot 100$	То же, что по К.М. Lee и др. [4]
S.R. Macklin [20]	$V_L = 0,23 e^{4,4LF} \quad \text{для } LF \geq 2$	LF – коэффициент нагрузки по R.J. Mair и др. [44]
C. Gonzalez и C. Sagaseta [15]	$V_L = \begin{cases} \frac{N_c}{I_r} & (N_q \leq N_{qe}) \\ \frac{N_{ce}}{I_r} \left(\frac{N_q}{N_{qe}} \right)^{\frac{1 - \sin \phi \sin \psi'}{\sin \phi (1 - \sin \psi')}} & (N_q > N_{qe}) \end{cases}$	ϕ – угол внутреннего трения; ψ' – угол растяжения; I_r – индекс жесткости грунта; N_c, N_{ce}, N_q, N_{qe} – коэффициенты перегрузки
C.P. Palmer и R.J. Mair [84]	$V_L = \frac{(1 - \nu^2) \gamma z_0}{E} (1 + K_0)$	ν – коэффициент Пуассона; K_0 – коэффициент горизонтальных напряжений
N. Loganathan [32]	$V_L = V_f + V_s + V_t$	V_f – перебор по лобовой части (<i>face loss</i>) ТПМК; V_s – перебор вдоль по длине оболочки щита (<i>shield void loss</i>) ТПМК; V_t – перебор в хвостовой части оболочки щита (<i>tail void loss</i>) ТПМК (после сползания с обделки тоннеля)
M.N. Vu и др. [33]	$V_L = V_{L,f} + V_{L,s} + V_{L,t} + V_{L,c}$	$V_{L,f}, V_{L,s}, V_{L,t}$ – то же, что по N. Loganathan [32]; $V_{L,c}$ – перебор после выполнения проходки (<i>consolidate void loss</i>) ТПМК (консолидационная составляющая)
H.Z. Cheng и др. [34]	$V_L = V_{L,f} + V_{L,s} + V_{L,t} + V_{L,c}$	$V_{L,f}, V_{L,s}, V_{L,t}$ – то же, что по N. Loganathan [32]; $V_{L,c}$ – то же, что по M.N. Vu и др. [33]

По результатам настоящей работы удалось систематизировать и выделить целый ряд исследователей, в первую очередь из США и Великобритании, которые в конце XX в. активно занимались прогнозом осадок земной поверхности и сооружений, а также проводили полевые наблюдения по результатам проходок тоннелей для определения коэффициента перебора грунта (объема «потери грунта») V_L . Признанный мировым сообществом исследователь проблемы осадок, связанных с тоннелепроходческими работами вследствие тоннельных проходок, Mair R.J. [85] в своем обзоре более 35 работ, представленных на конференции TC28 в Лондоне, посвященной этой проблеме, сделал следующие основные выводы:

1. При проходке тоннелей с открытым забоем (ОТВМ) коэффициент перебора грунта (V_L) в лондонских полутвердых глинах, как правило, варьируется в диапазоне 1,0–2,0 %.

2. Строительство с применением напыляемых бетонных покрытий (NATM) эффективно для контроля деформаций грунта. Исследования 80–90-х гг. XX в. при строительстве тоннелей в лондонских полутвердых глинах показали коэффициент перебора грунта (V_L), варьирующийся в диапазоне 0,5–1,5 %, что выгодно отличается от щитовых проходок тоннелей, но с открытым забоем или его небольшой поддержкой.

3. При проходке тоннелей с закрытым забоем с использованием щитов EPBM или SPBM, т.е. грунто- или гидропригрузом, можно добиться высокой степени контроля осадок, особенно в песках, где коэффициент перебора грунта (V_L) часто составляет ~0,5 % и менее. Даже при проходках в пластичных глинистых грунтах (без учета расчета консолидации) перебор составил диапазон всего 1,0–2,0 %, но при этом было значительное уменьшение по времени строительства тоннелей.

В табл. 3 собраны значения коэффициента перебора грунта V_L различных наиболее цитируемых исследователей. Также в ней отражены различные условия тоннельных проходок, тип щитовой машины и размеры тоннелей.

Таблица 3

Сводная таблица значений коэффициента перебора грунта V_L различных исследователей в различных условиях тоннельных проходок

Table 3

Summary table of the values of the volume loss V_L of various researchers in various tunnel conditions

Автор(ы)	Объект	Тип ТПМК	Диаметр Ø, м	Тип грунта	Значение V_L (%)
Пески					
M.P. O'Reilly и B.N. New [86]	Тоннель Айрширского дренажа (Великобритания)	ОТВМ	2,9	Мелкие и средние заиленные пески	0,7
	Тоннель WNTDC канализационный коллектор Ламб-Брук (Великобритания)	ОТВМ	3,6	Плотные пески	0,5
Y. Leblais и A. Bochon [87]	Авто-тоннель Фонтебло (Франция)	EPBM	9,25	Средние и крупные пески	0,2–0,9 0,8–1,3
S. Kanayasu и др. [63]	Тоннели линии №12 Токийского метро (Япония)	EPBM	~8,6	Пески и гравии	0,14
Z.C. Moh и др. [64]	Тоннели метро Тайбэй (Тайвань)	EPBM	~6,0	Илистый песок	~ 1,0
A.A. Ata [66]	Тоннели Каирского метро (Египет)	SPBM	9,48	Средние и крупные пески	0,2–1,0

Продолжение табл. 3

Автор(ы)	Объект	Тип ТПМК	Диаметр Ø, м	Тип грунта	Значение V_L (%)
М. Melis и др. [88]	Продление Мадридского метро линии 10 (Испания)	EPBM	9,4	Пески, илистые пески	≈ 3,0
С.-У. Ou и др. [67]	Тоннели линии Сянь-Тянь мет- ро Тайбэй (Тайвань)	EPBM	6,4	Илистый песок	≈ 2,60
К.Н. Bowers и N. Moss [89]	Тоннели в Лондоне (Велико- британия)	EPBM	8,15	Пески	≈ 0,37–0,62
V. Guglielmetti и др. [90]	Тоннели Туринского метро (Италия)	EPBM SPBM	~6,0	Пески	≈ 0,8–1,0
R.J. Mair [91]	Ж.д. каменный виадук Неаполь–Милан в Болонье (Италия)	EPBM	9,1	Пески, гравий	≈ 0,2
H.D. Netzel [92]	Второй Хайненоордский дву- путный тоннель (Голландия)	EPBM	8,3	Крупные пески	0,21–1,2
	Ж.д. тоннель в порту Болтэк (Роттердам, Голландия)	EPBM	9,65	Пески	0,5–1,1
	Тоннели Софийского метро (Болгария)	EPBM	9,5	Пески	0,21–1,2
V. Fagnoli и др. [93]	Тоннели Миланского метро ли- нии 5 (Италия)	EPBM	~6,5	Илистый гравелистый песок	0,27–0,82
A. Amorosi и др. [94]	Тоннель под акведуком Феличе (Италия)	EPBM	10,0	Песчаный туф	0,59
Z.X. Zhang и др. [95]	Тоннели метро линия 1 Чэнду (Китай)	EPBM	6,5	Песчаный галечник	0,78–0,96
S. Mahdi и др. [96]	Северное продление Парижско- го метро линии 12 (Франция)	EPBM	9,15	Пески, реже мергели	0,16
H.Z. Cheng и др. [34]	Тоннели Пекинского метро между (Китай)	EPBM	10,22	Средние и крупные пески	0,05–0,7
А.З. Тер-Марти- росян и др. [68]	Тоннель между ст. «Окская улица» – ст. «Стахановская улица» (Россия)	EPBM	10,3	Мелкие и средние пески	0,55–1,3
А.З. Тер-Марти- росян и др. [69]	Тоннель между ст. «Стаханов- ская улица» – ст. «Нижегород- ская» метро Москвы (Россия)	EPBM	10,3	Мелкие и средние пески	0,1–1,2
И.А. Тихонюк, Ю.В. Филатов, [72]					1,24
А.З. Тер-Марти- росян и др. [70]	Тоннель между ст. «Косино» – ст. «Юго-Восточная» метро Москвы (Россия)	EPBM	10,5	Крупные пески, с пе- реслоением суглинков	0,3–0,78
Глины					
M.P. O'Reilly и B.N. New [86]	Транспортный тоннель в Лон- доне (Великобритания)	OTBM	4,15	Лондонские полутвер- дые глины	1,0–1,4
B.B. Broms и J.N. Shirlaw [97]	Тоннели Сингапурского метро между ст. «Лавендер» – ст. «Багис»	EPBM	~6,0	Твердые глины	< 1,0
К.Н. Bowers и др. [89]	Опытный тоннель Хитроу- Экспресс (Великобритания)	OTBM	8,7	Лондонские полутвер- дые глины	1,0–1,3
		NATM			1,1–1,5
M. Barakat [98]		OTBM	~9,0		0,7–1,6
R.J. Mair, R.N. Taylor и J.B. Burland [99]	Расширение линии Юбилейной Лондонского метро (Велико- британия)	EPBM SPBM	9,1		1,0–2,0
D. Simic и G. Git- toes [65]	Тоннели Лиссабонского метро между ст. «Кайш-ду-Содре» – ст. «Байша-Шиаду» (Португалия)	EPBM	9,71	Пластичные глины	0,8–1,2

Окончание табл. 3

Автор(ы)	Объект	Тип ТПМК	Диаметр Ø, м	Тип грунта	Значение V_L (%)
Z.C. Moh и др. [64]	Тоннели метро Тайбэй (Тайвань)	EPBM	~6,0	Пластичные глины	≈ 1,3
M. Melis и др. [88]	Продление Мадридского метро линии 10 (Испания)	EPBM	9,4	Опесчаненные глины	0,52
C.-Y. Ou и др. [67]	Тоннели линии Сянь-Тянь мет- ро Тайбэй (Тайвань)	EPBM	6,4	Илистые глины	≈ 2,0
A. Ledesma и E. Romero [100]	Тоннели продления метрополи- тена Барселоны	OTBM	~8,0	Твердые глины	≈ 1,2
W.I. Chou и A. Bobet [101]	Южная линия тоннеля Риджент- Парк, Лондон (Великобритания)	EPBM	~4,4	Лондонские полутвер- дые глины	1,3–1,4
K.H. Bowers и N. Moss [89]	Тоннели в Лондоне (Велико- британия)	EPBM	8,15		≈ 0,48–0,68
M.G. Williamson [102]	Тоннели Лондонского метропо- литена под знанием 4-18 Bishops Bridge Road (BBR) (Великобритания)	EPBM	7,08		0,46–1,04
M.R. Golpasand и др. [103]	Тоннели Тегеранского метро (Иран)	EPBM	4,35	Опесчаненные суглинки	0,36–0,62
X. Xie и др. [104]	Автотоннель Инбинь-Сан Шан- хайского аэропорта (Китай)	EPBM	~14,0	Илистые глины, реже илистый песок	0,16–0,81
E.S. Ieronymaki и др. [18]	Тоннели проекта Crossrail в Гайд-парке (Великобритания)	EPBM	7,1	Лондонские полутвер- дые глины	0,72–1,0
H.Z. Cheng и др. [34]	Тоннели Пекинского метро между (Китай)	EPBM	10,22	Илистая глина	0,3–0,97
Смешанные и прочие грунты					
N. Loganathan и H.G. Poulos [5]	Тоннель Грин парк (Великобри- тания)	EPBM	~4,1	Пески и гравий, твер- дые глины	≈ 1,6
Jr.A. Negro и др. [105]	Тоннели метро Сан-Паулу и некоторые другие (Бразилия)	NATM <i>et al.</i>	4,1–10,8	Илы, пески, глины	0,5–2,0
M. Kavvadas [106]	Тоннели линии 2 и 3 Афинского метро (Греция)	NATM	9,5	Песчаники, алевроли- ты, глинистые сланцы, известняки	0,1–0,47
J.N. Shirlaw и др. [107]	Северо-восточная скоростная транзитная линия (Сингапур)	EPBM	5,8	Речные пески и мор- ские глины	0,5
K.C. Lim и др. [108]		EPBM	~6,0	Гранитный осадочный грунт	1,38
A. Unlutep и др. [109]	Тоннели Измирского метро пе- регонов ст. «Конак» – ст. «Чан- кая» – ст. «Басман» (Турция)	OTBM	~6,5	Илы, пески, глины	0,17–1,52
S.G. Ercelebi и др. [110]	Тоннели Стамбульского метро перегонов ст. «Эсенлер» – ст. «Башакшехир» (Турция)	EPBM	~6,5	Плотные пески, твер- дые глины	0,5–1,0
A.З. Тер-Марти- росян и др. [71]	Тоннель между ст. «Звениго- родская» – ст. «Карамышевская» метро Москвы (Россия)	EPBM	6,3	Пески	1,18–1,20
				Глины	0,67–0,73
				Глинистые/скальные	0,54–0,79
				Песчаные/скальные	0,68–1,11

Примечание:

EPBM (Earth Pressure Boring Machine) – ТПМК с грунтопригрузом;

SPBM (Slurry Pressure Boring Machine) – ТПМК с гидропригрузом;

OTBM (Open Pressure Boring Machine) – ТПМК с открытым забоем;

NATM (New Austrian Tunnelling Method – Ново-Австрийский Тоннельный Метод) – ТПМК с набрызг-бетоном (торкретбетоном).

Важной оговоркой к таблице является отсутствие в ней такого параметра, как C/D (H/D), т.е. отношение заглубления тоннеля к диаметру выработки, впервые предложенного R.J. Maig с соавторами [44]. Его отсутствие объясняется двумя причинами: во-первых, большинство работ исследователей и анализ полевых данных реализованных проектов выполнялись для условий проходки $C/D \gg 1,0$; во-вторых, к сожалению, не все авторы в результатах своих работ приводят исчерпывающие значения показателей исследований. Также на основе опыта похожих проектных решений и технико-экономического обоснования можно предположить, что при $C/D < 1,0$ целесообразность закрытой проходки становится экономически невыгодной, более того, высокая близость проходки к фундаментам сооружений и инженерным коммуникациям создает угрозу безопасности с учетом технологических особенностей работы ТПМК.

В большинстве современных работ по численному моделированию дополнительных осадок земной поверхности, зданий и сооружений приведены достаточно полные данные по самим МКЭ- и МКР-моделям, включая характеристики грунтов и конструкций сооружений, а также объем полевых данных результатов мониторинга. Однако чаще всего отсутствуют как назначаемые значения коэффициента перебора грунта (V_L), так и выводы на основании анализа о том, оказался ли принимаемый авторами V_L точным или по результатам мониторинга он оказался иным. В исследовании (2024) [119] отмечено, что в работе Н. Chakeri и В. Ünver [26] авторы выделяют существенные факторы, влияющие на максимальную осадку поверхности, которыми являются диаметр тоннеля, глубина заложения тоннеля, удельный вес, угол внутреннего трения, сцепление, Модуль Юнга, коэффициент Пуассона, давление в забое ТПМК и нагрузка по поверхности; из чего можно сделать вывод, что авторы понимают и выделяют большую важность физико-механических характеристик грунтового массива проходки. При отсутствии в работе непосредственно коэффициента перебора грунта V_L исследователи указывают в выводах большое количество характеристик грунта, которые носят «базовый» характер данных инженерных изысканий, отмечая их важность.

Большой объем исследований по численному анализу создал необходимость «физически» имитировать процесс тоннельной проходки ТПМК. Так, в численных методах появился *gap*-метод, т.е. моделирование зазора при проходке, а также α - и β -методы, свойственные в большей степени при закрытых проходках в скальных или полускальных грунтах, когда возможно держать открытым забой тоннеля в грунтовом массиве. И уже позже, с 2000-х гг. XXI в. с развитием МКЭ и МКР-анализа появилась возможность моделировать коэффициент перебора грунта V_L в том виде, в котором он существует сейчас.

Традиционно коэффициент перебора грунта V_L оценивался на основе результатов полевых измерений процесса мониторинга в похожих условиях путем анализа расчетного значения полученных осадок для уравнений М.Р. О'Reilly и В.М. New [86]; Р.В. Attewell и др. [111]; W.J. Rankin [112] и R.J. Maig и др. [113] с дополнениями В. Jones [114]; и даже сравнивают вариант с общепризнанным исследованием R.B. Peck [35]. Затем начали появляться уравнения осадок поверхности с учетом коэффициента перебора грунта V_L таких авторов, как Е. Arioglu [83]; S.R. Macklin [20]; N. Loganathan [32]; M.N. Vu и др. [33]; H.Z. Cheng и др. [34] и других, где V_L уже имеет собственную вычисляемую эмпирическую зависимость. В целом можно отметить, что формулы V_L , содержащие коэффициент устойчивости забоя N , по данным исследований ряда авторов для глинистых грунтов, показывают хороший результат, хотя некоторые авторы пытаются применять ее и к пескам. Осо-

бенность этих зависимостей заключается в необходимости данных о недренированной прочности грунта (c_u), которую получают либо полевыми испытаниями, например методом крыльчатки или СРТу, либо прибором трехосного сжатия по схеме НН или КН, что осложняет задачу с учетом специфичности этих данных.

Для формулы (3) S.R. Macklin [20] отмечается противоположная другим исследованиям и физике процесса зависимость, когда с ростом заглубления тоннеля растет и коэффициент перебора грунта V_L . Соответственно критерий применения формулы, скорее, корректен только для относительно мелкозаглубленных тоннелей при соотношении $C/D \leq 2,0$, как указано в работе R.J. Mair и R.N. Taylor [51], а для глубоких проходок результаты по вычислению V_L , скорее, некорректны. Именно так M.N. Vu и др. [33] принимают диапазон соотношения $C/D \leq 1,8$ для расчета коэффициента перед обрушением забоя (критический) N_{TC} , указывая, что условия заложения тоннеля становятся более безопасными, когда соотношение C/D становится больше, но при этом в выводах отмечают, что в случае соотношения $C/D \leq 1$ перебор в забое тоннеля оказывает очень существенное влияние на общую потерю объема. При этом на практике проходку тоннелей чаще всего и осуществляют с отношением $C/D \geq 1,8$ из условий безопасности, т.е. недопущения выпора грунта на поверхности перед забоем ТПМК, так как необходимо поддерживать стабильное давление нагнетания бентонитового раствора для его циркуляции вдоль поверхности оболочки ТПМК при проходке и при этом не допустить его прорыва на поверхность. Работа M.N. Vu и др. [33] из Делфтского университета имеет прикладное значение больше при строительстве в сложных геологических условиях Нидерландов, а именно для массивов сложенных преимущественно слабыми грунтами в нестабилизированном состоянии (органоминеральные грунты, торф), развивая идеи К.М. Лее и др. [3, 4] и N. Loganathan [32] и добавляя слабый компонент коэффициента перебора в виде консолидационной составляющей ($V_{L,c}$), преимущественно используемой для моделей слабых грунтов (*Soft Soil u Soft Soil Creep*) при численных методах, такие как: C_s – константа компрессии, C_{swel} – константа упругости, где «swel – swelling» – обозначение упругого подъема, т.е. фактическое определение ветви разгрузки (рис. 8).

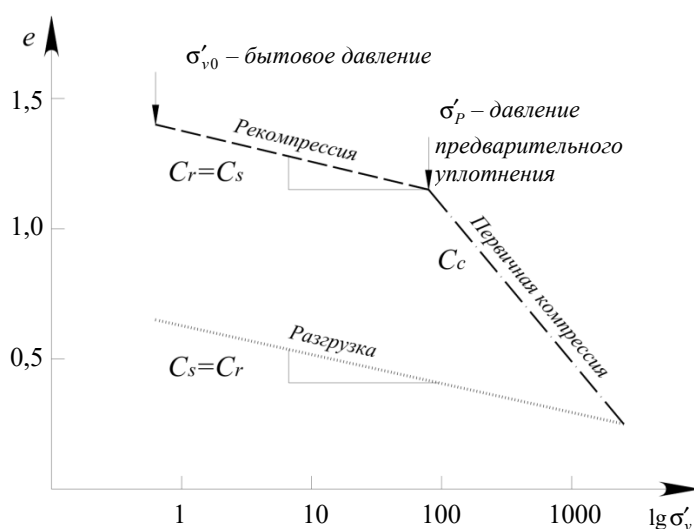


Рис. 8. График компрессионной кривой с ветвью разгрузки
 Fig. 8. Graph of the compression curve with an unloading branch

Однако, в исследовании M.N. Vu и др. [33] не оказалось подробной формулы для вычисления коэффициента перебора вдоль оболочки ТПМК ($V_{L,s}$), а приведен лишь набор значений опытно-статистических данных для верхней и нижней границы выработки. Также M.N. Vu и др. [33] указывают, что максимальное давление в забое в случае разрыва пласта для нормально уплотненных грунтов требуется вычислять по А. Mori и др. [49], но при этом отмечают, что по отчетам BTL (Boren van Tunnels en Leidingen, Нидерланды) отмечено часто и более высокое давление на грунт в забое тоннеля. И также приводят уравнение для вычисления коэффициента устойчивости забоя N по B.B. Broms и H. Bennermark [37] без дополнения по G.W. Clough и B. Schmidt [79] об учете давления нагрузки по поверхности (фундаментов) и уравнение расчета пластической зоны при вычислении компонента перебора в хвостовой части ($V_{L,t}$), где M.N. Vu и др. [33] используют уравнение для определения радиуса R_p пластической зоны по R.N. Taylor [56] и H.-S. Yu [59], где должно было быть все то же уравнение для вычисления коэффициента устойчивости N , т.е. остается под вопросом, учитывали ли эти данные при своих исследованиях авторы. В свою очередь, при расчете объема осадки поверхности $V_{s,t}$, к сожалению, не указывают точной методики для его определения. И можно лишь предположить, что для изменения выбора расстояния от расчетной точки на поверхности до центра тоннеля строится кривая гауссовой функции и интеграл по ней даст площадь на единицу длины. Однако это является очень трудоемким процессом, и можно было бы использовать уравнение R.B. Peck [35] и получить прямую формулу определения объема осадки поверхности $V_{s,t}$:

$$V_{s,t} = \int_{-\infty}^{+\infty} u_t dx = i_x \sqrt{2\pi u_t}. \quad (8)$$

В то же время параметр расстояния от центра тоннеля по горизонтали до точки перегиба кривой осадок i_x можно было бы вычислять по формуле R.J. Mair и др. [113] или B. Jones [114], которую M.N. Vu и др. [53] уже использовали для анализа данных и теоретических моделей, но данная формула будет требовать дальнейшей апробации в применении. В заключении своего большого исследования в качестве выводов M.N. Vu и др. [33] указывают, что независимо от грунтовых условий для туннеля с $D = 6$ м следует, что $V_{L,s,\max} = 0,7 \%$, при $D = 8$ м, $V_{L,s,\max} = 0,57 \%$ и при $D = 10$ м, $V_{L,s,\max} = 0,5 \%$, что вызывает вопросы и требует большего обоснования таких относительно небольших величин перебора грунта, учитывая и тот факт, что вся работа посвящена слабым грунтам.

В работе исследователей H.Z. Cheng и др. [34] представлены достаточно хорошо апробированные данные на основании работ прошлых лет, которые, по их мнению, показывают хорошую сходимость с результатами натурных наблюдений при прогнозировании осадок земной поверхности и представленной ими работы. При этом в расчете суммарного значения коэффициента перебора грунта V_L по четырем компонентам присутствует достаточно большое количество эмпирических данных, которые сложно воспроизвести даже в похожих грунтовых условиях. В работе авторы не указывают уравнение для вычисления коэффициента устойчивости забоя N и учитывает ли оно дополнение по G.W. Clough и B. Schmidt [79] о суммировании давления нагрузки по поверхности (фундаментов).

Работа N. Loganathan [32] выглядит максимально обоснованной за исключением того, что вычисление суммарного коэффициента перебора грунта V_L является эмпирическим значением и имеет ряд спорных вычисляемых и задаваемых параметров (k , Ω , V_t). Важно отметить, что не удалось найти исследования, подтверждающие использование положений

N. Loganathan [32] в прямом виде другими исследователями – модифицированный V_L есть у исследователей H.Z. Cheng и др. [34]. Аналогично не найдено апробаций исследования M.N. Vu и др. [33], которое одновременно является и оригинальной, особенно в части расчета компонента консолидационной составляющей $V_{L,c}$, и несколько специфичной для местного опыта применения с учетом наличия слабых грунтов в нестабилизированном состоянии.

Обсуждение и выводы

В настоящий момент вычислительные мощности ЭВМ и численные методы позволили сделать их передовыми инструментами в оценке осадок поверхности земли и сооружений при тоннелепроходческих работах за счет учета условий проектирования, близких к реальным. Аналитические и эмпирические методы, в свою очередь, как отмечено в исследовании [1], чаще всего уже не могут отвечать всем реалиям и стандартам современных методик проектирования и в целом тоннелестроения, несмотря на относительную простоту, быстроту и инженерную точность оценки осадок поверхности грунта. Также можно отметить, что данные результатов полевых измерений осадок поверхности различных исследователей в разное время от тоннелепроходческих работ (см. табл. 3) показывают тенденцию к достаточному пониманию накопленного опыта в данном вопросе.

Современные исследования чаще сводятся к методике определения коэффициента перебора грунта (V_L – *volume loss*) с последующим вычислением осадок численными методами, так как они наиболее точно отвечают требованиям современных геомеханических моделей грунтовой среды при учете всевозможных факторов при оценке воздействия тоннелепроходческих работ. Это, в свою очередь, может сформировать новую группу методов – численно-эмпирических. С ростом количества расчетов численными методами в области геотехники, которое пришлось на последние 15–20 лет, выделяются две наиболее актуальные и корректные, по мнению авторов, методики по определению коэффициента перебора грунта V_L авторов N. Loganathan [32] и M.N. Vu [33]. Обе методики не являются заменой или дополнением другой в виду различного подхода их авторов, а также особенностей местного опыта проектирования (исследования) и грунтовых условий, анализом результатов которых они явились [33]. Сами по себе они вызывают ряд вопросов, а их использование осложняется наличием ряда факторов, таких как недренированная прочность грунта c_u . Для предварительных расчетов при вычислении коэффициента перебора V_L по E. Arioglu [83]; S.R. Macklin [20]; N. Loganathan [32]; M.N. Vu с соавторами [33] и др. для первичного определения параметра c_u для грунтов авторы предлагают использовать полевые испытания статического зондирования, из которых можно определить недренированную прочность (c_u) по T. Lunne и A. Kleven [115] как

$$c_u = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{N_k}; \quad (9)$$

для CPNu-испытаний:

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{k,t}}, \quad (10)$$

где q_c (q_t) – удельное сопротивление грунта под наконечником (конусом) зонда; σ_{v0} – напряжения от собственного веса грунта; N_k – эмпирический коэффициент, среднее значение

ние, как функция числа пластичности, определяется опытным путем (зависит от формы зонда и фактора глубины).

$$N_k = 19 - \frac{I_P - 10}{5}; \quad (11)$$

где I_P – число пластичности грунта, для $I_P > 10$.

Типичное значение N_k от 11 до 19 для нормально уплотненных глин. Согласно Т. Lunne и др. [116] и О. Kjekstad и F. Stub [117] для переуплотненных глин $N_k = 17$. Подробно об этом указано в монографии Г.Г. Болдырева [118].

Или же можно использовать более упрощенные способы определения недренированной прочности (c_u):

- теория XIX в. Н. Tresca [119]:

$$c_u = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}; \quad (12)$$

- более актуальный способ по A.W. Skempton и D.J. Henkel [120]:

$$\frac{c_u}{\sigma'_1} = 0,11 + 0,37 \frac{I_P}{100}, \quad (13)$$

где σ'_1 – эффективное вертикальное напряжение, т.е. за вычетом порового давления $\sigma'_1 = (\sigma_1 - u)$.

Если недренированная прочность грунта c_u может быть определена полевыми и/или лабораторными испытаниями, то наличие эмпирических коэффициентов разных авторов усложняет процесс понимания работы непростой формулы коэффициента перебора грунта V_L , а учитывая вариации различных авторов, производивших свои исследования в различных грунтовых условиях, можно сказать, что все эмпирические формулы носят субъективный характер, должны быть достаточно апробированы и в большей степени могут применяться для конкретной местности.

Также некоторые работы по численным методам вызывают сомнения, так как в них необъясненным образом моделируется нижняя граница моделей, порой во много раз больше диаметра тоннеля и глубины заложения. При этом используются модели грунта MC и HS, в которых отсутствует возможность ограничения деформаций (сверхмалых деформаций), о чем регулярно упоминают в своих работах А.З. Тер-Мартirosян, Р.Ф. Шарафутдинов и др., и что указано в нормативном документе РФ Приложения Е СП 249.1325800.2016. При этом в исследовании R.F. Sharafutdinov и др. [73] авторы явно указывают, что применение моделей грунта HS и HSS выдают значения осадок поверхности и сооружений больше получаемых данных геодезического мониторинга, и рекомендуют использовать модель грунта MC, а не HS или HSS.

В завершение можно отметить, что анализ многолетних исследований авторов разного времени и для разнообразных грунтовых условий дает возможность полагать, что для подавляющего большинства данных, особенно предоставленных за последние десятилетия, значение коэффициента перебора грунта V_L ниже значений, указанных в табл. Ж.1 СП 249.1325800.2016, а порой значительно меньше. Это, в свою очередь, создает необходимость развития этого геотехнического направления в поисках оптимальных и качественных решений по определению осадок от тоннелепроходческих работ.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Тихонюк, И.А. Обзор аналитических и эмпирических методов расчета осадок поверхности грунта при щитовой проходке / И.А. Тихонюк // *Construction and Geotechnics*. – 2024. – Т. 15, № 4. – С. 78–101. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.4.07
2. Rowe, R.K. A theoretical examination of the settlements induced by tunnelling: Four Case Histories / R.K. Rowe, G.J. Kack // *Canadian Geotechnical Journal*. – 1983. – Vol. 20. – P. 299–314.
3. Lee, K.M. Finite element modelling of the three-dimensional ground deformations due to tunnelling in soft cohesive soils: Part I–Method of analysis / K.M. Lee, R.K. Rowe // *Computers and Geotechnics*. – 1990. – No. 10(2). – P. 87–109.
4. Lee, K.M. Subsidence owing to tunnelling. I. Estimating the gap parameter / K.M. Lee, R.K. Rowe, K.Y. Lo // *Canadian Geotechnical Journal*. – 1992. – Vol. 29. – P. 929–940.
5. Loganathan, N. Analytical Predictions of Tunnelling Induced Ground Movements / N. Loganathan, H.G. Poulos // *Geotechnical Engineering Journal, American Society of Civil Engineers*. – 1998. – Vol. 124, no. 9.
6. Panet, M. Analysis of convergence behind the face of a tunnel. / M. Panet, A. Guenot // *Proceedings of International Symposium Tunnelling'82. June 7 to 11 1982. – The Institution of Mining and Metallurgy, Brighton, London, 1982. – P. 197–204.*
7. Swoboda, G. Finite element analysis of the New Austrian Tunneling Method (NATM) / G. Swoboda // *Proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Aachen. – 1979. – April 2 to 6. – Vol. 2. – P. 581–586.*
8. Swoboda, G. Finite element modelling of tunnel excavation / G. Swoboda, M. Marenc, I. Mader // *International Journal of Engineering Modelling*. 1994. – No. 6. – P. 51–63.
9. Möller, S.C. Tunnel induced settlements and structural forces in linings. Doctoral Dissertation / S.C. Möller. – 2006. – 174 p.
10. Jáky, J. The coefficient of earth pressure at rest / J. Jáky // *Journal of the Union of Hungarian Engineers and Architects*. – 1944. – P. 355–358.
11. Строкова, Л.А. Численное моделирование оседания поверхности при проходке метрополитена / Л.А. Строкова // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2009. – № 3. – С. 29–31.
12. Bian, X. Evaluating the effect of soil structure on the ground response during shield tunnelling in Shanghai soft clay / X. Bian, Z.S. Hong, J.W. Ding // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2016. – Vol. 58. – P. 120–132.
13. Karakus, M. Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis / M. Karakus // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2007. – Vol. 22(1). – P. 47–56.
14. Potts, D.M. Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory. – Vol. 1 / D.M. Potts, L. Zdravković. – London: Thomas Telford, 1999.
15. Gonzalez, C. Patterns of soil deformations around tunnels: application to the extension of Madrid metro / C. Gonzalez, C. Sagaseta // *Comput. Geotech.* – 2001. – Vol. 28. – P. 445–468.

16. Numerical and analytical modeling of ground Deformations Due to shallow tunneling in soft soils. / A.J. Whittle, Y.M. Hsieh, F.P into, Y. Chatzigiannelis // First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, June 12 to 15, 2001. – Cambridge, MA, USA. – P. 546–549.
17. Whittle, A.J. Analyzing the effects of gaining and losing ground / A.J. Whittle, C. Sagaseta // Soil behavior soft ground construction. – Eds. J.T. Germain [et al.]. – ASCE, Reston, VA. – 2003. – Vol. 119. – P. 255–291.
18. Ieronymaki, E.S. Interpretation of free-field ground movements caused by mechanized tunnel construction / E.S. Ieronymaki, A.J. Whittle, D.S. SureDa // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2017. – Vol. 143(4). – P. 04016114.
19. Leca, E. Settlements induced by tunneling in soft ground / E. Leca, B. New // Tunnelling Underground Space Technol. – 2007. – Vol. 22(2). – P. 119–149.
20. Macklin, S.R. The prediction of volume loss due to tunnelling in overconsolidated clay based on heading geometry and stability number / S.R. Macklin // Ground engineering. – 1999. – Vol. 32(4). – P. 30–33.
21. Simpson, B. The influence of anisotropy on calculations of ground settlements above tunnels / B. Simpson, J.H. Atkinson, V. Jovicis // Proceedings of International Symposium on Geotechnical Aspects of the Underground Construction in Soft Ground. – 1996. – P. 511–514.
22. Potts, D.M. A structures influence on tunnelling-induced ground movements / D.M. Potts, T.I. Addenbrooke // Proc. Instn Civ Engrs, Geotechnical Engineering. – 1997. – Vol. 125. – P. 109–125.
23. Gong, Q.M. Shield tunneling beneath existing railway line in soft ground / Q.M. Gong, S.H. Zhou // Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Proceedings of the 6th International Symposium (IS-Shanghai 2008). – London: CRC Press, 2008. – P. 381–384.
24. Zhang, H.J. Numerical analysis of shield tunnel driving underneath an existing railway and related reinforcement effects on subsidence control / H.J. Zhang, Q. Gong, H.G. Di // ICPTT 2014: Creating Infrastructure for a Sustainable World, the Committee on Sustainability of the American Society of Civil Engineers, California, USA, 6 to 8 November 2014. – 2014. – P. 828–835.
25. Zhao, Y. Tunneling-induced settlement evaluation for new tunnel underneath existing tunnel / Y. Zhao, T. Qi // Proceedings of Geo-Shanghai 2014, Shanghai, China, ASCE, Reston, VA, May 26 to 28 2014. – 2014. – P. 143–154.
26. Chakeri, H. A new equation for estimating the maximum surface settlement above tunnels excavated in soft ground / H. Chakeri, B. Ünver // Environmental Earth Sciences. – 2014. – Vol. 71(7). – P. 3195–3210.
27. Тупи́ков, М.М. Особенности деформирования грунтового массива и сооружений при строительстве мелкозаглубленных коммуникационных тоннелей в городских условиях: дис. ... канд. техн. наук / М.М. Тупи́ков. – М., 2010. – 184 с.
28. Исаев, О.Н. К вопросу влияния расчётных параметров на моделирование перемещений грунта при проходке тоннеля / О.Н. Исаев, И.А. Боков, Р.Ф. Шарафутдинов // Труды международной конференции по геотехнике «Геотехнические проблемы мегаполисов». Москва, 7-10 июня 2010 г. – 2010. – Т. 4. – С. 1547–1554.
29. Исаев, О.Н. Перебор грунта при строительстве коммуникационных тоннелей щитовым способом / О.Н. Исаев, Р.Ф. Шарафутдинов // Механизация строительства. – 2012. – № 6(816). – С. 2–7.

30. Петрухин, В.П. Геотехнический прогноз при строительстве коммуникационных тоннелей методом щитовой проходки / В.П. Петрухин, О.Н. Исаев, Р.Ф. Шарафутдинов // Вестник НИЦ «Строительство». – 2014. – № 10. – с. 114–131.
31. Numerical analysis of influence of large-diameter EPB shield tunneling on ground deformation in Beijing area / T. Gong, X. Yang, C. Qi, D. Ding // Proceedings of 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, Atlantis Press, Paris, France, 7 September 2012. – 2012. – P. 864–869.
32. Loganathan, N. An innovative method for assessing tunnelling-induced risks to adjacent structures / N. Loganathan. – New York: Parsons Brinckerhoff Inc., 2011.
33. Vu, M.N. Volume loss in shallow tunneling / M.N. Vu, W. Broere, J. Bosch // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2016. – Vol. 59. – P. 77–90.
34. Cheng, H.Z. Analysis of ground surface settlement induced by a large EPB shield tunnelling: a case study in Beijing, China / H.Z. Cheng, J. Chen, G.L. Chen // Environmental Earth Sciences. – 2019. – Vol. 78, iss. 20.
35. Peck, R.B. Deep excavation and tunnelling in soft ground. State of the art report / R.B. Peck // Proc 7th Int Conf SMFE. – Mexico City, 1969. – P. 147–150.
36. Hanya, T. Ground movements due to construction of shields-driven tunnel / T. Hanya // 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo. – 1977. – P. 759–790.
37. Broms, B.B. Stability of clay at vertical openings / B.B. Broms, H. Bennermark // Journal of Soil Mechanics and Foundations Division. – 1967. – Vol. 193(SM1). – P. 71–94.
38. Bezuijen, A. Bentonite and grout flow around a TBM / A. Bezuijen // Underground Space –The 4th Dimension of Metropolises, Three Volume Set + CD-ROM: Proceedings of the World Tunnel Congress 2007 and 33rd ITA/AITES Annual General Assembly, Prague, May 2007. – CRC Press, 2007. – P. 383.
39. Lagerblad, B. Shrinkage and Durability of Shotcrete / B. Lagerblad, L. Fjallberg, C. Vogt // Proceeding of Shotcrete Elements of a System. Ed. E.S. Bernard. – London: Taylor & Francis Group, 2010. – P. 173–180.
40. Ingles, O.G. Soil Stabilisation / O.G. Ingles. – Sydney: Butterworths, 1972.
41. Loganathan, N. Estimation of ground loss During tunnel excavation» / N. Loganathan, H.G. Poulos, A. Bustos-Ramirez // Paper presented at GeoEng2000, Melbourne, Australia, 2000.
42. Loganathan, N. Prediction of tunnelling-induced ground movements: assessment and evaluation / N. Loganathan, R.F. Flanagan // Proceedings of the Underground, Singapore, 2001.
43. EPB TBM tunneling in Singapore old alluvium / N. Loganathan, J. O'Carroll, R.F. Flanagan, B.T. Tan // Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference, Seattle, Washington, United States, June 2005.
44. Mair, R.J. Ground movements around shallow tunnels in soft clay / R.J. Mair, M.J. Gunn, M.P. O'Reilly // 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. – Stockholm, 1981. – P. 323–328.
45. Mair, R.J. Geotechnical aspects of soft ground tunneling / R.J. Mair // Proceedings of International Symposium on Construction Problems in Soft Soils. – Singapore: Nanyang Technological Institute, 1983.
46. Attewell, P.B. Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures / P.B. Attewell, J. Yeates, A.R. Selby. – New York, Methuen, Inc., 1986.
47. O'Reilly, M.P. Evaluating and predicting ground settlements caused by tunnelling in London Clay / M.P. O'Reilly // Proc. Tunnelling '88. – London: IMM, 1988.

48. Mair, R.J. Discussion leaders report on session 9: Selection of Design parameters for underground construction / R.J. Mair // *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio De. 1989. – Vol. 5. – P. 2891–2893.
49. A suitable slurry pressure in slurry-type shield tunneling / A. Mori, M. Tamura, K. Kurihara, H. Shibata // *Proc Tunnelling '91*. – London, 1991. – P. 361–369.
50. Jancsecz, S. Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions / S. Jancsecz, W. Steiner // *Tunnelling 94*. – Springer, 1994. – P. 531–550.
51. Mair, R.J. Bored tunnelling in the urban environment. State-of-the-art Report and Theme Lecture / R.J. Mair, R.N. Taylor // *Proceedings of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – Hamburg: Balkema, 1997. – Vol.4. – P. 2353–2385.
52. Dimmock, P.S. Estimating volume loss for open-face tunnels in London clay / P.S. Dimmock, R.J. Mair // *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*. – 2007. – Vol. 160 (1). – P. 13–22.
53. Vu, M.N. Effects of cover depth on ground movements induced by shallow tunneling / M.N. Vu, W. Broere, J.W. Bosch // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2015. – Vol. 50. – P. 499–506.
54. Nagel, F. Grout and bentonite flow around a TBM: Computational modeling and simulation-based assessment of influence on surface settlements / F. Nagel, G. Meschke // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2011. – Vol. 26 (3). – P. 445–452.
55. Sagaseta, C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss / C. Sagaseta // *Geotechnique*. – 1987. – Vol. 37. – P. 301–320.
56. Taylor, R.N. Prediction of clay behavior around tunnels using plasticity solutions / R.N. Taylor // *Predictive Soil Mechanics: Proceedings of the Wroth Memorial Symposium Held at St. Catherine's College, Oxford, 27-29 July 1992*. – Thomas Telford, 1992. – P. 449.
57. Verruijt, A.A. complex variable solution for a deforming circular tunnel in an elastic half-plane / A.A. Verruijt // *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*. – 1997. – Vol. 21 (2). – P. 77–89.
58. Strack, O.E. Analytic solutions of elastic tunneling problems. Ph.D. thesis / O.E. Strack. – Delft University of Technology, 2002.
59. Yu, H.-S. Cavity expansion methods in geomechanics / H.-S. Yu. – Springer Science & Business Media, 2013.
60. Terzaghi, K. Theoretical Soil Mechanics / K. Terzaghi. – 1944.
61. Bogusz, W. Prediction of tunneling-induced ground movements / W. Bogusz. Doctoral Dissertation, 2021. – 123 p.
62. Nomoto, T. Overview on ground movements during shield tunneling – A survey on Japanese shield tunneling / T. Nomoto, H. Mori, M. Matsumoto // *Underground Construction in Soft Ground*. – Balkema, 1995. – P. 345–351.
63. Kanayasu, S. Stability of excavation face in earth pressure balanced shield / S. Kanayasu, Y. Yamamoto, Y. Kitahara // *Underground Construction in Soft Ground*. – Balkema, 1995. – P. 265–268.
64. Moh, Z.C. Ground movements around tunnels in soft ground / Z.C. Moh, D.H. Ju, R.N. Hwang // *Proceedings International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. – 1996. – Vol. 730. – Balkema, 1996. – P. 725–730.
65. Simic, D. Ground behaviour and potential damage to buildings caused by the construction of a large diameter tunnel for the Lisbon Metro / D. Simic, G. Gittoes // *Proc. Int. Symp. on Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*. Eds. R.J. Mair, R.N. Taylor. – Rotterdam: Balkema, 1996. – P. 745–752.

66. Ata, A.A. Ground settlements induced by slurry shield tunnelling in stratified soils / A.A. Ata // Proceedings of the International Conference on North American tunnelling'96 and the 22nd General Assembly of the International tunneling association. – Vol. 1. – Washington, 1996. – P. 43–50.
67. Ou, C.-Y. Surface settlement during shield tunnelling at CH218 in Taipei / C.-Y. Ou, R.N. Hwang, Wei-Jung Lai // Canadian Geotechnical Journal. – 1998. – Vol. 35(1). – P. 159–168.
68. Определение фактического коэффициента перебора грунта путем анализа данных мониторинга / А.З. Тер-Мартirosян, Н.Ф. Бабушкин, И.О. Исаев, В.В. Шишкина // Геотехника. – 2020. – Т. VII, № 1. – С. 34–42.
69. Тер-Мартirosян, А.З. Определение фактического коэффициента перебора (участок «Стахановская улица» – «Нижегородская улица») / А.З. Тер-Мартirosян, И.О. Исаев, А.С. Алмакаева // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15, № 12. – С. 1644–1653.
70. Определение фактического коэффициента перебора (участок «Косино» – «Юго-Восточная») / А.З. Тер-Мартirosян, В.П. Кивлюк, И.О. Исаев, В.В. Шишкина // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 2. – С. 5–14. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.2.01
71. Фактическое значение коэффициента перебора для тоннелей в дисперсных и скальных грунтах / А.З. Тер-Мартirosян, Р.Х. Черкесов, И.О. Исаев, В.В. Рудь // Жилищное строительство. – 2023. – № 9. – С. 61–73.
72. Тихонюк, И.А. Определение комплексного коэффициента перебора грунта при щитовой проходке метрополитена / И.А. Тихонюк, Ю.В. Филатов // Геотехника. – 2022. – Т. XIV, № 1. – С. 30–48. DOI: 10.25296/2221-5514-2022-14-1-30-48
73. Sharafutdinov, R.F. A study of the ground volume loss modeling technique influence the soil displacement in course of shield tunneling / R.F. Sharafutdinov, O.N. Isaev, D.S. Zakatov // Smart Geotechnics for Smart Societies. – 2023. – P. 1042–1051.
74. Evaluation of lateral and axial deformation for earth pressure balance (EPB) tunnel construction using 3 dimension finite element method / F. Aldiamar, M. Irsyam, B. Hutapea, E. Susila, R. Nazir // Journal of Engineering and Technological Sciences. – 2021. – Vol. 53(5). – P. 210503.
75. Çelik, S. Comparison of Mohr-Coulomb and Hardening Soil Models numerical estimation of ground surface settlement caused by tunneling / S. Çelik // Journal of the Institute of Science and Technology. – 2017. – Vol. 7 (4). – P. 95–102. DOI: 10.21597/jist.2017.202
76. Petrukhin, V.P. Modeling of deformations of the soil mass during tunneling. Part 1: Studies of the influence of calculated parameters (in Russian) / V.P. Petrukhin, O.N. Isaev, R.F. Sharafutdinov // Transport Construction. – 2014. – No. 9. – P. 7–11.
77. Petrukhin, V.P. Modeling of deformations of the soil mass during tunneling. Part 2: Method of selection of numerical simulation parameters (in Russian) / V.P. Petrukhin, O.N. Isaev, R.F. Sharafutdinov // Transport Construction. – 2014. – No. 10. – P. 14–15.
78. Glossop, N.H. Soil deformation caused by soft ground tunnelling. Ph.D. Thesis / N.H. Glossop. – University of Durham, 1978. – 313 p.
79. Clough, G.W. Design and performance of excavations and tunnels in soft clay / G.W. Clough, B. Schmidt // Soft Clay engineering. – 1981. – P. 569–634.
80. Mitchell, R.J. Earth structure engineering / R.J. Mitchell. – Boston: Allen and Unwin, 1983.
81. Uriel, A.O. Selection of design parameters for underground construction / A.O. Uriel, C. Sagaseta // Proceedings of the 12th International Congress on Soils Mechanics, Río de Janeiro,

13–18 August 1989. General report, Discussion session. – Rotterdam: A.A. Balkema, 1989. – Vol. 9. – P. 2521–2551.

82. Leca, E. Analysis of NATM and shield tunneling in soft ground. Ph.D. Thesis / E. Leca. – Virginia Polytechnic Institute and State University, 1989.

83. Arioglu, E. Surface movements due to tunnelling activities in urban areas and minimization of building damages / E. Arioglu // Short Course. – Istanbul Technical University, Mining Engineering Department, 1992. – 43 p.

84. Palmer, C.P. Ground movements above tunnels: a method for calculating volume loss / C.P. Palmer, R.J. Mair // Can Geotech J. – 2011. – Vol. 48(48). – P. 451–457.

85. Mair, R.J. General report on settlement effects of bored tunnels. Session report, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground / R.J. Mair // Proceedings International Symposium, City University, London, 15-17 April 1996. – Rotterdam: Balkema, 1996. – P. 43–53.

86. O'Reilly, M.P. Settlements above tunnels in the United Kingdom – Their magnitude and prediction / M.P. O'Reilly, B.M. New // Tunnelling. – 1982. – P. 173–181.

87. Leblais, Y. Villejust tunnel: slurry shields effects on soft and lining behavior and comments on monitoring requirement / Y. Leblais, A. Bochon // Tunnelling. – 1991. – P. 65–77.

88. Ground displacements in Madrid soils due to tunnel excavation with earth pressure TBM / M. Melis, M. Arnaiz, C.S. Oteo, F. Mendana // Proc. of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. – Hamburg, 1997. – P. 1433–1436.

89. Bowers, K.H. Settlement due to tunnelling on the CTRL London Tunnels / K.H. Bowers, N. Moss // Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. – Taylor & Francis, 2006. – P. 203–209.

90. Mechanized tunnelling in urban areas: Design methodology and construction control / V. Guglielmetti, P. Grasso, A. Mahtab, S. Xu. // Geodata S.p.A. Turin, Italy, St Petersburg: Polytechnic university publishing house, 2008. – P. 602.

91. Mair, R.J. Tunnelling and geotechnics: new horizons / R.J. Mair // Géotechnique. – 2008. – Vol. 58, no. 9. – P. 695–736.

92. Netzel, H.D. Building response due to ground movements / H.D. Netzel. – Delft University of Technology, 2009.

93. Fargnoli, V. TBM tunnelling-induced settlements in coarse-grained soils: the case of the new Milan underground line 5. 14 / V. Fargnoli, D. Boldini, A. Amorosi // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2013. – Vol. 38. – P. 336–347.

94. Tunnelling-induced deformation and damage on historical masonry structures / A. Amorosi, D. Boldini, G. De Felice, M. Malena, M. Sebastianelli // Géotechnique. – 2014. – Vol. 64(2). – P. 118–130.

95. Zhang, Z.X. A case study on the behavior of shield tunneling in sandy cobble ground / Z.X. Zhang, H. Zhang, J.Y. Yan. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. – P. 1891–1900.

96. Mahdi, S. Back analysis of ground settlements induced by TBM excavation for the north extension of Paris metro, line 12 / S. Mahdi, O. Gastebled, S. Khodr // World Tunnel Congress 2019 – Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology. – Naples: Taylor & Francis, 2019. – P. 2606–2615.

97. Broms, B.B. Settlements caused by earth Pressure balance shields in Singapore / B.B. Broms, J.N. Shirlaw // Tunnels en Terrain Meuble – Du Chantier a la theorie. Proc. Nationale des Peuts et Chaussees. – Paris, 1989. – P. 209–229.

98. Barakat, M. Measurement of ground settlements and building deformations due to tunnelling. Ph.D. thesis / M. Barakat. – Imperial College, 1996.
99. Mair, R.J. Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunneling / R.J. Mair, R.N. Taylor, J.B. Burland // *Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. – 1996. – P. 713–718.
100. Ledesma, A. Systematic backanalysis in tunnel excavation problems as a monitoring technique / A. Ledesma, E. Romero // *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering – International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 1997. – Vol. 3. – P. 1425–1428.
101. Chou, W.I. Predictions of ground deformations in shallow tunnels in clay / W.I. Chou, A. Bobet // *Tunn. Undergr. Space Technol.* – 2002. – Vol. 17 (1). – P. 3–19.
102. Williamson, M.G. Tunnelling effects on bored piles in clay. Ph.D. Thesis / M.G. Williamson. – Cambridge University, 2014. – 426 p.
103. Golpasand, M.R.B. Specifying the real value of volume loss (V_L) and its effect on ground settlement due to excavation of Abuzar tunnel, Tehran / M.R.B. Golpasand, M.R. Nikudel, A. Uromeihy // *Bull Eng Geol Environ.* – 2016. – Vol. 75(2). – P. 485–501.
104. Xie, X. Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a large-diameter shield-driven tunnel in Shanghai, China / X. Xie, Y. Yang, J. Mei // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2016. – Vol. 51. – P. 120–132.
105. Negro, Jr.A. Tunnelling A in Sao Paulo, Brazil / Jr.A. Negro, L.E. Sozio, A.A. Ferreira // *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. – Rotterdam: Balkema, 1996. – P. 295–300.
106. Kavvadas, M.J. Experiences from the construction of the Athens Metro project / M.J. Kavvadas // *Proc. 12th European Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam, June 1999, Invited Lecture*. – 1999. – Vol. 3. – P. 1665–1676.
107. Immediate settlements due to tunnelling for the North East Line / J.N. Shirlaw [et al.] // *Underground Singapore*. – 2001. – P. 76–90.
108. Lim, K.C. Numerical Fitting Attempts of Tunnelling-Induced Ground Movement in Granitic Residual Soil / K.C. Lim, F.H. Lee, K.K. Phoon // *Underground Singapore*. – 2003. – P. 196–203.
109. Unlutepe, A. Predicted and observed ground deformations due to TBM tunnel excavations on the Izmir metro project (stage 1) / A. Unlutepe, V. Tellioglu, B. Arioglu // *Conference: ITA-AITES World Tunnel Congress, Budapest, Hungary, 2009*. – Vol.: O-06-01.
110. Ercelebi, S.G. Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB-TBM / S.G. Ercelebi, H. Copur, I. Ocak // *Environ Earth Sci.* – 2011. – Vol. 62(2). – P. 357–365.
111. Attewell, P.B. Predicting the Dynamics of ground settlement and its Derivatives caused by tunnelling in soil / P.B. Attewell, J.P. Woodman // *Ground Engineering*. – 1982. – No. 15(8). – P. 13–22.
112. Rankin W.J. Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects / W.J. Rankin // *Engineering Geology of Underground Movement, Geological Society, Engineering Geology Special Publication*. – 1988. – No. 5. – P. 79–92.
113. Mair, R.J. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays / R.J. Mair, R.N. Taylor, A. Bracegirdle // *Geotechnique*. – 1993. – Vol. 43. – P. 315–320.
114. Jones, B. Low-volume-loss tunnelling for London ring main extension / B. Jones // *Proceedings of the ICE – Geotechnical Engineering*. – 2010. – Vol. 163(3). – P. 167–185.

115. Lunne, T. Role of CPT in North Sea foundation engineering / T. Lunne, A. Kleven // *Proceedings of Geotechnical Engineering division Session, ASCE National Convention, St. Louis, Missouri*. – 1981. – P. 76–107.
116. Lunne, T. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice / T. Lunne, P.K. Robertson, J.J.M. Powell. – London: Blackie Academic & Professional, 1997. – 312 p.
117. Kjekstad, O. Installation of the Elf TCP-2 Condeep platform at the Frigg field / O. Kjekstad, F. Stub // *Proc. Eur. Offshore Petrol. Conf., London*. – 1978. – Vol. 1. – P. 121.
118. Болдырев Г.Г. Руководство по интерпретации данных испытаний методами статического и динамического зондирования для геотехнического проектирования / Г.Г. Балдырев. – М.: ООО «Прондо», 2017. – 476 с.
119. Tresca, H. Mémoire sur l'écoulement des corps solides soumis à de fortes pressions / H. Tresca // *C.R. Acad. Sci. – Paris*. – 1864 – Vol. 59. – P. 754.
120. Skempton, A.W. The Post-Glacial Clays of the Thames Estuary at Tillbury and Shellhaven / A.W. Skempton, D.J. Henkel // *Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich*. – 1953. – Vol. 1. – P. 302–308.

References

1. Tikhoniuk I.A. Review of analytical and empirical methods for calculating soil surface settlement during shield tunneling. *Construction and Geotechnics*, 2024, vol. 15, iss. 4, pp. 78–101. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.4.07.
2. Rowe R.K., Kack G.J. A theoretical examination of the settlements induced by tunnelling: Four Case Histories. *Canadian Geotechnical Journal*, 1983, vol. 20, pp. 299–314.
3. Lee K.M., Rowe R.K. Finite element modelling of the three-dimensional ground deformations due to tunnelling in soft cohesive soils: Part I. Method of analysis. *Computers and Geotechnics*, 1990, no. 10(2), pp. 87–109.
4. Lee K.M., Rowe R.K., Lo K.Y. Subsidence owing to tunnelling. I. Estimating the gap parameter. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, vol. 29, pp. 929–940.
5. Loganathan N., Poulos H.G. Analytical predictions of tunnelling induced ground movements. *Geotechnical Engineering Journal, American Society of Civil Engineers*, 1998, vol. 124, no. 9.
6. Panet M., Guenot A. Analysis of convergence behind the face of a tunnel. *Proceedings of International Symposium Tunnelling'82*. 7 to 11 June 1982. Brighton, London, The Institution of Mining and Metallurgy, 1982, pp. 197–204.
7. Swoboda G. Finite element analysis of the New Austrian Tunneling Method (NATM). *Proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Aachen, 2 to 6 April 1979, vol. 2, pp. 581–586.
8. Swoboda G., Marence M., Mader I. Finite element modelling of tunnel excavation. *International Journal of Engineering Modelling*, 1994, no. 6, pp. 51–63.
9. Möller S.C. Tunnel induced settlements and structural forces in linings. Doctoral Dissertation, 2006, 174 p.
10. Jáky J. The coefficient of earth pressure at rest. *Journal of the Union of Hungarian Engineers and Architects*, 1944, pp. 355–358.
11. Strokova L.A. Numerical modeling of surface subsidence during metro tunneling. *Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2009, No. 3, pp. 29–31.
12. Bian X., Hong Z.S., Ding J.W. Evaluating the effect of soil structure on the ground response during shield tunnelling in Shanghai soft clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, vol. 58, pp. 120–132.

13. Karakus M. Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, vol. 22(1), pp. 47-56.
14. Potts D.M., Zdravković L. Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory. Vol. 1. London, Thomas Telford, 1999.
15. Gonzalez C., Sagaseta C. Patterns of soil deformations around tunnels: application to the extension of Madrid metro. *Comput. Geotech.*, 2001, vol. 28, pp. 445-468.
16. Whittle A.J., Hsieh Y.M., Pinto F., Chatzigiannellis Y. Numerical and analytical modeling of ground Deformations Due to shallow tunneling in soft soils. *First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics*. Massachusetts Institute of Technology Cambridge, 12 to 15 June 2001, Cambridge, 2001, pp. 546-549.
17. Whittle A.J., Sagaseta C. Analyzing the effects of gaining and losing ground. *Soil behavior soft ground construction*, 2003, vol. 119, pp. 255-291.
18. Ieronymaki E.S., Whittle A.J., SureDa D.S. Interpretation of free-field ground movements caused by mechanized tunnel construction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, vol. 143(4), pp. 04016114.
19. Leca E., New B. Settlements induced by tunneling in soft ground. *Tunnelling Underground Space Technol.*, 2007, vol. 22(2), pp. 119-149.
20. Macklin S.R. The prediction of volume loss due to tunnelling in overconsolidated clay based on heading geometry and stability number. *Ground engineering*, 1999, vol. 32(4), pp. 30-33.
21. Simpson B., Atkinson J.H., Jovicis V. The influence of anisotropy on calculations of ground settlements above tunnels. *Proceedings of International Symposium on Geotechnical Aspects of the Underground Construction in Soft Ground*, 1996, pp. 511-514.
22. Potts D.M., Addenbrooke T.I. A structures influence on tunnelling-induced ground movements. *Proc. Instn Civ Engrs, Geotechnical Engineering*, 1997, vol. 125, pp. 109-125.
23. Gong Q.M., Zhou S.H. Shield tunneling beneath existing railway line in soft ground. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Proceedings of the 6th International Symposium (IS-Shanghai 2008)*, London, CRC Press, pp. 381-384.
24. Zhang H.J., Gong Q., Di H.G. Numerical analysis of shield tunnel driving underneath an existing railway and related reinforcement effects on subsidence control. *ICPTT 2014: Creating Infrastructure for a Sustainable World, the Committee on Sustainability of the American Society of Civil Engineers*, California, USA, 6 to 8 November 2014, pp. 828-835.
25. Zhao Y., Qi T. Tunneling-induced settlement evaluation for new tunnel underneath existing tunnel. *Proceedings of Geo-Shanghai*, Shanghai, China, ASCE, Reston, VA, 26 to 28 May 2014, pp. 143-154.
26. Chakeri H., Ünver B. A new equation for estimating the maximum surface settlement above tunnels excavated in soft ground. *Environmental Earth Sciences*, 2014, vol. 71(7), pp. 3195-3210.
27. Tupikov M.M. Peculiarities of the ground massif and structures deformation during the construction of shallow communication tunnels in urban conditions / dissertation. Abstract Ph. D. thesis. Moscow, 2010, 184 p.
28. Isaev O.H., Bokov I.A., Sharafutdinov R.F. To the question of influence of calculation parameters on modeling of ground displacements during tunneling. *Proceedings of the International Conference on Geotechnics "Geotechnical Problems of Megacities"*, Moscow, 7-10 June 2010, vol. 4, pp. 1547-1554.
29. Isaev O.N., Sharafutdinov R.F. Soil removal during construction of communication tunnels by shield method. *Mechanization of Construction*, 2012, no. 6(816), pp. 2-7.

30. Petrukhin V.P., Isaev O.N., Sharafutdinov R.F. Geotechnical prediction in the construction of communication tunnels by shield boring method. *Vestnik SIC "Construction"*, 2014, no. 10, pp. 114-131.
31. Gong T., Yang X., Qi C., Ding, D. Numerical analysis of influence of large-diameter EPB shield tunneling on ground deformation in Beijing area. *Proceedings of 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, Paris, Atlantis Press, 2012, pp. 864-869.
32. Loganathan N. An innovative method for assessing tunnelling-induced risks to adjacent structures. New York, Parsons Brinckerhoff Inc., 2011.
33. Vu M.N., Broere W., Bosch J. Volume loss in shallow tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, vol. 59, pp. 77-90.
34. Cheng H.Z., Chen J., Chen G.L. Analysis of ground surface settlement induced by a large EPB shield tunnelling: a case study in Beijing, China. *Environmental Earth Sciences*, 2019, vol. 78, iss. 20.
35. Peck R.B. Deep excavation and tunnelling in soft ground. State of the art report. *Proc 7th Int Conf SMFE*, Mexico City, 1969, pp. 147-150.
36. Hanya T. Ground movements due to construction of shields-driven tunnel. *9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, 1977, pp. 759-790.
37. Broms B.B. and Bennermark H. Stability of clay at vertical openings. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 1967, vol. 193(SM1), pp. 71-94.
38. Bezuijen A. Bentonite and grout flow around a TBM. *Underground Space –The 4th Dimension of Metropolises, Proceedings of the World Tunnel Congress 2007 and 33rd ITA/AITES Annual General Assembly*, Prague, 2007, pp. 383.
39. Lagerblad B., Fjallberg L., Vogt C. Shrinkage and durability of shotcrete. *Proceeding of Shotcrete Elements of a System*, Ed. E.S. Bernard, London, Taylor & Francis Group, 2010, pp. 173-180.
40. Ingles O.G. Soil Stabilisation. Sydney, Butterworths, 1972.
41. Loganathan N., Poulos H.G., Bustos-Ramirez A. Estimation of ground loss During tunnel excavation». *Paper presented at GeoEng2000*, Melbourne, Australia, 2000.
42. Loganathan N., Flanagan R.F. Prediction of tunnelling-induced ground movements: assessment and evaluation. *Proceedings of the Underground*, Singapore, 2001.
43. Loganathan N., O'Carroll J., Flanagan R.F., Tan B.T. EPB TBM tunneling in Singapore old alluvium. *Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference*, Seattle, Washington, 2005.
44. Mair R.J., Gunn M.J., O'Reilly M.P. Ground movements around shallow tunnels in soft clay. *10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, 1981, pp. 323-328.
45. Mair R.J. Geotechnical aspects of soft ground tunnelling. *Proceedings of International Symposium on Construction Problems in Soft Soils*. Singapore, Nanyang Technological Institute, 1983.
46. Attewell P.B., Yeates J., Selby A.R. Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures. New York, Methuen, Inc., 1986.
47. O'Reilly M.P. Evaluating and predicting ground settlements caused by tunnelling in London Clay. *Proc. Tunnelling '88*. IMM, London, 1988.
48. Mair R.J. Discussion leaders report on session 9: Selection of Design parameters for underground construction. *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio De, 1989, vol. 5, pp. 2891–2893.

49. Mori A., Tamura M., Kurihara K., Shibata H. A suitable slurry pressure in slurry-type shield tunneling. *Proc Tunnelling '91*, London, 1991, pp. 361–369.
50. Jancsecz S., Steiner W. Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions. *Tunnelling 94*, Springer, 1994, pp. 531–550.
51. Mair R.J., and Taylor R.N. Bored tunnelling in the urban environment. State-of-the-art Report and Theme Lecture. *Proceedings of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Balkema, Hamburg, 1997, vol. 4, pp. 2353–2385.
52. Dimmock P.S., Mair R.J. Estimating volume loss for open-face tunnels in London clay. *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*, 2007, vol. 160 (1), pp. 13–22.
53. Vu M.N., Broere W., Bosch J. W. Effects of cover depth on ground movements induced by shallow tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, vol. 50, pp. 499–506.
54. Nagel F., Meschke G. Grout and bentonite flow around a TBM: Computational modeling and simulation-based assessment of influence on surface settlements. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, vol. 26 (3), pp. 445–452.
55. Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss. *Geotechnique*, 1987, vol. 37, pp. 301–320.
56. Taylor R.N. Prediction of clay behavior around tunnels using plasticity solutions. In: Predictive Soil Mechanics. *Proceedings of the Wroth Memorial Symposium Held at St. Catherine's College*, Oxford, 27–29 July 1992. Thomas Telford, pp. 449.
57. Verruijt A. A complex variable solution for a deforming circular tunnel in an elastic half-plane. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 1997, vol. 21 (2), pp. 77–89.
58. Strack O.E. Analytic solutions of elastic tunneling problems. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 2002.
59. Yu H.-S. Cavity expansion methods in geomechanics. Springer Science & Business Media, 2013.
60. Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics. 1944.
61. Bogusz W. Prediction of tunneling-induced ground movements. Doctoral Dissertation, 2021, 123 p.
62. Nomoto T., Mori H., Matsumoto M. Overview on ground movements during shield tunneling – A survey on Japanese shield tunneling. *Underground Construction in Soft Ground*. Edited by Fujita and Kusakabe. Balkema, 1995, pp. 345–351.
63. Kanayasu S., Yamamoto Y., Kitahara Y. Stability of excavation face in earth pressure balanced shield. *Underground Construction in Soft Ground*. Balkema, 1995, pp. 265–268.
64. Moh Z.C., Ju D.H., Hwang R.N. Ground movements around tunnels in soft ground. *Proceedings International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, 1996, vol. 730, pp. 725–730.
65. Simic D., Gittoes G. Ground behaviour and potential damage to buildings caused by the construction of a large diameter tunnel for the Lisbon Metro. *Proc. Int. Symp. on Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*. Eds. R.J. Mair, R.N. Taylor. Rotterdam, Balkema, 1996, pp. 745–752.
66. Ata A.A. Ground settlements induced by slurry shield tunnelling in stratified soils. *Proceedings of the International Conference on North American tunnelling'96 and the 22nd General Assembly of the International tunneling association*, 1996, vol. 1, Washington, pp. 43–50.
67. Ou C.-Y., Hwang R.N., Wei-Jung Lai. Surface settlement during shield tunnelling at CH218 in Taipei. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, vol. 35(1), pp. 159–168.

68. Ter-Martirosyan A.Z., Babushkin N.F., Isaev I.O., Shishkina V.V. Determination of actual soil overshoot coefficient by analyzing monitoring data. *Geotechnics*, 2020, vol. VII, no. 1, pp. 34–42.
69. Тер-Мартirosян А.З., Исаев И.О., Алмакаева А.С. Определение фактического коэффициента перебора (участок «Стахановская улица» – «Нижегородская улица»). Вестник МГСУ, 2020b, Том 15, № 12, -с.1644–1653.
70. Ter-Martirosian A.Z., Kivliuk V.P., Isaev I.O., Shishkina V.V. Determination of the actual excess excavation ratio (section “Kosino” – “Yugo-Vostochnaya”). *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 2, pp. 5–14. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.2.01.
71. Ter-Martirosyan A.Z., Cherkesov R.Kh., Isaev I.O., Rud V.V. Actual value of the overshoot coefficient for tunnels in dispersed and rocky soils. *Zhishchnoe stroitelstvo*, 2023, no. 9, pp. 61–73.
72. Tikhonyuk I.A., Filatov Yu.V. Determination of complex coefficient of soil over-excavation during shield tunneling of subway. *Geotechnics*, 2022, Vol. XIV, no. 1, pp. 30–48. DOI: 10.25296/2221-5514-2022-14-1-30-48.
73. Sharafutdinov R.F., Isaev O.N. & Zakatov D.S. A study of the ground volume loss modeling technique influence the soil displacement in course of shield tunneling. *Smart Geotechnics for Smart Societies*. – Eds. Zhussupbekov, Sarsembayeva, Kaliakin, 2023, pp. 1042–1051.
74. Aldiamar F., Irsyam M., Hutapea B., Susila E., Nazir R. Evaluation of lateral and axial deformation for earth pressure balance (EPB) Tunnel Construction Using 3 Dimension Finite Element Method. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 2021, vol. 53(5), p. 210503.
75. Çelik S. Comparison of Mohr-Coulomb and Hardening Soil Models numerical estimation of ground surface settlement caused by tunneling. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2017, vol. 7 (4), pp. 95–102. DOI: 10.21597/jist.2017.202.
76. Petrukhin V.P., Isaev O.N., Sharafutdinov R.F. Modeling of deformations of the soil mass during tunneling. Part 1: Studies of the influence of calculated parameters (in Russian). *Transport Construction*, 2014, no. 9, pp. 7–11.
77. Petrukhin V.P., Isaev O.N., Sharafutdinov R.F. Modeling of deformations of the soil mass during tunneling. Part 2: Method of selection of numerical simulation parameters (in Russian). *Transport Construction*, 2014, no. 10, pp. 14–15.
78. Glossop N.H. Soil deformation caused by soft ground tunnelling. Ph.D. Thesis. University of Durham, 1978, 313 p.
79. Clough G.W., Schmidt B. Design and performance of excavations and tunnels in soft clay. *Soft Clay engineering*. Eds. E.W. Brand, R. Brenner. 1981, pp. 569–634.
80. Mitchell R.J. Earth structure engineering. Boston, Allen and Unwin, 1983.
81. Uriel A.O., Sagaseta C. Selection of design parameters for underground construction. *Proceedings of the 12th International Congress on Soils Mechanics*, Rio de Janeiro, 13–18 August 1989. General report, Discussion session. A.A. Balkema, Rotterdam, 1989, vol. 9, pp. 2521–2551.
82. Leca E. Analysis of NATM and shield tunneling in soft ground. Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1989.
83. Arioglu E. Surface movements due to tunnelling activities in urban areas and minimization of building damages. *Short Course*, Istanbul Technical University, Mining Engineering Department, 1992, 43 p.
84. Palmer C.P., Mair R.J. Ground movements above tunnels: a method for calculating volume loss. *Can Geotech J*, 2011, vol. 48(48), pp. 451–457.
85. Mair R.J. General report on settlement effects of bored tunnels. Session report. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground – Proceedings International Symposium*, City University, London, 15–17 April 1996, Rotterdam, Balkema, pp. 43–53.

86. O'Reilly M.P., New B.M. Settlements above tunnels in the United Kingdom – Their magnitude and prediction. *Tunnelling*, 1982, pp. 173-181.
87. Leblais Y., Bochon A. Villejust tunnel: slurry shields effects on soft and lining behavior and comments on monitoring requirement. *Tunnelling*, 1991, pp. 65-77.
88. Melis M., Arnaiz M., Oteo C.S., Mendana F. Ground displacements in Madrid soils due to tunnel excavation with earth pressure TBM. *Proc. of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Hamburg, 1997, pp. 1433–1436.
89. Bowers K.H., Moss N. Settlement due to tunnelling on the CTRL London Tunnels. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. Taylor & Francis, 2006, pp. 203–209.
90. Guglielmetti V., Grasso P., Mahtab A., Xu S. Mechanized tunnelling in urban areas: Design methodology and construction control. Geodata S.p.A. Turin, Italy – St Petersburg: Polytechnic university publishing house, 2008, p. 602.
91. Mair R.J. Tunnelling and geotechnics: new horizons. *Géotechnique*, 2008, vol. 58, no. 9, pp. 695-736.
92. Netzel H.D. Building response due to ground movements. Delft University of Technology, 2009.
93. Fargnoli V., Boldini D., Amorosi A. TBM tunnelling-induced settlements in coarse-grained soils: the case of the new Milan underground line 5. 14. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, vol. 38, pp. 336–347.
94. Amorosi A., Boldini D., De Felice G., Malena M., Sebastianelli M. Tunnelling-induced deformation and damage on historical masonry structures, *Géotechnique*, 2014, vol. 64(2), pp. 118-130.
95. Zhang Z.X., Zhang H., Yan J.Y. A case study on the behavior of shield tunneling in sandy cobble ground. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, pp. 1891–1900.
96. Mahdi S., Gastebled O., Khodr S. Back analysis of ground settlements induced by TBM excavation for the north extension of Paris metro, line 12. *World Tunnel Congress 2019 – Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology*. Naples, Taylor & Francis, 2019, pp. 2606–2615.
97. Broms B.B., Shirlaw J.N. Settlements caused by earth Pressure balance shields in Singapore. *Tunnels en Terrain Meuble – Du Chantier a la theorie. Proc. Nationale des Peuts et Chaussees*, Paris, 1989. pp. 209-229.
98. Barakat M. Measurement of ground settlements and building deformations due to tunnelling. Ph.D thesis. Imperial College, 1996.
99. Mair R.J., Taylor R.N., Burland J.B. Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling. *Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, 1996, pp. 713-718.
100. Ledesma A., Romero E. Systematic backanalysis in tunnel excavation problems as a monitoring technique. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering- International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1997, vol. 3, pp. 1425–1428.
101. Chou W.I., Bobet A. Predictions of ground deformations in shallow tunnels in clay. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2002, vol. 17 (1), pp. 3–19.
102. Williamson M.G. Tunnelling effects on bored piles in clay. Ph.D. Thesis. Cambridge University, 2014, 426 p.

103. Golpasand M.R.B., Nikudel M.R., Uromeihy A. Specifying the real value of volume loss (VL) and its effect on ground settlement due to excavation of Abuzar tunnel, Tehran. *Bull Eng Geol Environ*, 2016, vol. 75(2), pp. 485–501.
104. Xie X., Yang Y., Mei J. Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a large-diameter shield-driven tunnel in Shanghai, China. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, vol. 51, pp. 120–132.
105. Negro Jr A., Sozio L.E., Ferreira A.A. Tunnelling A in Sao Paulo, Brazil. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Rotterdam, Balkema, 1996, pp. 295–300.
106. Kavvas M.J. Experiences from the construction of the Athens Metro project. *Proc. 12th European Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Amsterdam, June 1999, Invited Lecture, 1999, vol. 3, pp. 1665–1676.
107. Shirlaw J.N., Ong J.C.W., Rosser H.B., Heslop P.J.E., Osborne S.H., Tan C.G., Heslop P.J.E. Immediate settlements due to tunnelling for the North East Line. *Underground Singapore*, 2001, pp. 76–90.
108. Lim K.C., Lee F.H., Phoon K.K. Numerical fitting attempts of tunnelling-induced ground movement in granitic residual soil. *Underground Singapore*, 2003, pp. 196–203.
109. Unlutep A., Tellioglu V., Arioglu B. Predicted and observed ground deformations due to TBM tunnel excavations on the Izmir metro project (stage 1). *Conference: ITA-AITES World Tunnel Congress*, Budapest, Hungary, 2009, vol. O-06-01.
110. Ercelebi S.G., Copur H., Ocak I. Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB-TBM. *Environ Earth Sci*, 2011, vol. 62(2), pp. 357–365.
111. Attewell P.B., Woodman J.P. Predicting the Dynamics of ground settlement and its Derivatives caused by tunnelling in soil. *Ground Engineering*, 1982, no. 15(8), pp. 13–22.
112. Rankin W.J. Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects. *Engineering Geology of Underground Movement, Geological Society, Engineering Geology Special Publication*, 1988, no. 5, pp. 79–92.
113. Mair R.J., Taylor R.N., Bracegirdle A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays. *Geotechnique*, 1993, vol. 43, pp. 315–320.
114. Jones B. Low-volume-loss tunnelling for London ring main extension. *Proceedings of the ICE – Geotechnical Engineering*, 2010, vol. 163(3), pp. 167–185.
115. Lunne T., Kleven A. Role of CPT in North Sea foundation engineering. *Proceedings of Geotechnical Engineering division Session, ASCE National Convention*, St. Louis, Missouri. 1981, pp. 76–107.
116. Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. London, Blackie Academic & Professional, 1997, pp. 312.
117. Kjekstad O., Stub F. Installation of the Elf TCP-2 Condeep platform at the Frigg field. *Proc. Eur. Offshore Petrol. Conf.* London, 1978, vol. 1, p. 121.
118. Boldyrev G.G. Guidelines for the interpretation of test data by static and dynamic sensing methods for geotechnical design: monograph. Moscow, Pronto, 2017, 476 p.
119. Tresca H. Mémoire sur l'écoulement des corps solides soumis à de fortes pressions. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 1864, vol. 59, pp. 754.
120. Skempton A.W., Henkel D.J. The Post-Glacial Clays of the Thames Estuary at Tillbury and Shellhaven. *Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, 1953, vol. 1, pp. 302–308.