

УДК 624.042.13

Факторы, влияющие на распределение добавочного давления на тоннели метрополитена от наземного строительства

А. А. Сокорнов, А. Н. Коньков, А. Л. Новиков, А. В. Бенин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Сокорнов А. А., Коньков А. Н., Новиков А. Л., Бенин А. В. Факторы, влияющие на распределение добавочного давления на тоннели метрополитена от наземного строительства // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 367–377. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-367-377

Аннотация

Цель: Выполнить анализ факторов, влияющих на распределение добавочного давления от наземного строительства на обделки перегонных тоннелей метрополитена. **Методы:** Математическое моделирование методом конечных элементов системы, включающей в себя грунтовый массив, обделку перегонного тоннеля и нагрузку от фундамента наземного сооружения. **Результаты:** Установлен вид графика распределения добавочного давления от наземного строительства в ненарушенном массиве и в массиве, напряженно-деформированное состояние которого нарушено проходкой тоннеля. Установлено, что изменение добавочного давления прямо пропорционально изменению нагрузки как по глубине, так и на расстоянии от оси фундамента; этот закон сохраняется при изменении любых других параметров (в ненарушенном грунтовом массиве и в массиве, напряженно-деформированное состояние которого изменено проходкой тоннеля, при разном способе моделирования проходки тоннеля, при использовании разных геомеханических моделей грунта). Установлено, что величина добавочного давления от наземного строительства практически не зависит от способа моделирования проходки тоннеля. Обосновано различие результатов при описании грунта в модели Мора — Кулона и в ее модификации. **Практическая значимость:** Показана возможность достаточно точно определить величину добавочного давления от наземного строительства на обделку тоннеля, не обладая информацией о способе его проходки.

Ключевые слова: Тоннели метрополитена, давление, напряжения, грунтовый массив, метод конечных элементов.

В Санкт-Петербурге, как и в любом крупном городе мира, развитие сети метрополитена сопровождается активным наземным строительством. В некоторых случаях строительство новых жилых и промышленных комплексов затрагивает

территории охранных зон метрополитена. В течение последних лет кафедра «Тоннели и метрополитены» ФГБОУ ВО ПГУПС осуществляла научное сопровождение многих объектов капитального строительства с выполнением геотехнических рас-

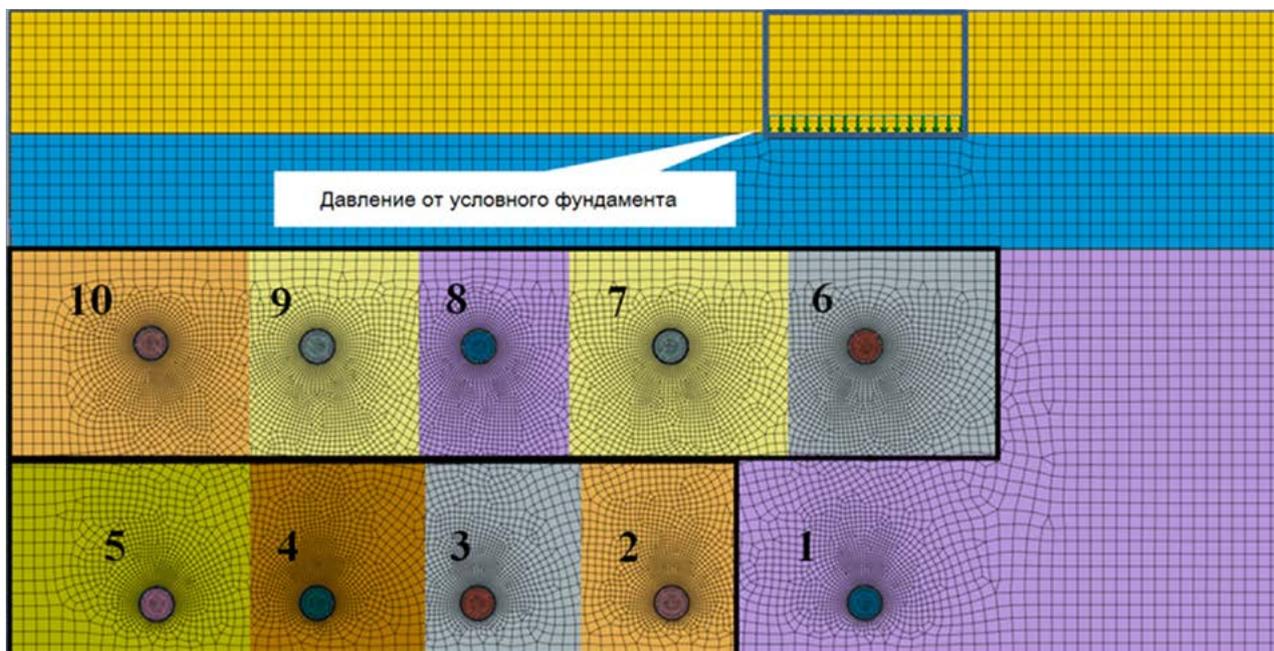


Рис. 1. Общий вид математических моделей

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические характеристики грунтов

№ слоя	Описание грунта	E , МПа	ν	γ , кН/м ³	C , кПа	ϕ
1	Мелкие пески и пластичные глины	12	0,3	20	15	19
2	Мелкие пески	28	0,2	21	0	34
3	Протерозойские сине-зеленые твердые глины	200	0,23	22	500	23

четов влияния возводимых зданий на сооружения метрополитена, как с применением аналитических методов, так и с помощью математического моделирования [1, 2]. На данный момент одним из направлений научной деятельности кафедры является установление закономерностей распределения добавочного давления от строящихся зданий на сооружения метрополитена, корректировка или доработка аналитических методик.

Для изучения факторов, влияющих на распределение добавочного давления на тоннели метрополитена от наземного строительства, было рассмотрено одиннадцать плоских математических моделей с расположением перегонного тоннеля на разной глубине и на разном расстоянии от условного фундамента здания (рис. 1). Во всех моделях условный фундамент модели-

ровал работу свайного фундамента в плоской постановке: нагрузка приложена равномерно распределенной непосредственно к уровню острия свай, без учета сил трения свай по грунтам. Ширина подошвы условного фундамента принята 30 м.

Размеры грунтового массива составили 100 м по высоте и 200 м по ширине. Массив состоит из трех слоев, которые являются типичными для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга: верхний слой представлен мелкими песками и пластичными глинами, средний слой — мелкими песками, а нижний слой — коренными грунтами Санкт-Петербурга — протерозойскими сине-зелеными твердыми глинами. На начальном этапе расчетов для описания физико-механических характеристик грунтов была применена

модель Мора — Кулона. Характеристики грунтов приведены в табл. 1.

Для описания свойств тоннельных обделок применялась линейно-деформируемая модель. Характеристики железобетона принимались следующими:

- модуль упругости: $E = 34\,500$ МПа;
- коэффициент Пуассона: $\nu = 0,2$;
- объемный вес: $\gamma = 24$ кН/м³.

В моделях № 1–5 тоннель расположен на глубине 70 м от низа условного фундамента (на глубоком заложении) на расстояниях 0, 30, 60, 85 и 110 м от оси фундамента. В моделях № 6–10 тоннель расположен на глубине 30 м от низа условного фундамента (на мелком заложении) на тех же расстояниях от его оси. Помимо указанных 10 моделей рассматривалась еще одна модель аналогичных размеров, но без тоннеля.

В каждой модели выполнялась серия расчетов для определения влияния ряда факторов на распределение добавочного давления:

- 1) с разной нагрузкой по подошве условного фундамента здания (300 кПа и 150 кПа);
- 2) с учетом проходки тоннеля и без него (напряжения в нетронutom грунтовом массиве);
- 3) с разным начальным напряженным состоянием системы «обделка — грунтовый массив» (с учетом снятия давления на контуре выработки и без него);
- 4) с разной геомеханической моделью вмещающего тоннель грунта (модель Мора — Кулона и модифицированная модель Мора — Кулона, или модель упрочняющегося грунта).

С учетом требований отечественных норм, а также из расчетного опыта кафедры «Тоннели и метрополитены» нагрузка от здания принималась равной 15 кПа от каждого этажа, таким образом, нагрузка в 300 кПа эквивалентна нагрузке от двадцатиэтажного здания, 150 кПа — нагрузке от десятиэтажного здания.

Проходка тоннеля в методе конечных элементов может моделироваться двумя способами [3–6]:

1) активацией элементов обделки в напряженном грунтовом массиве, что характерно для случая, когда обделка тоннеля воспринимает всю нагрузку от вышележащих слоев грунта (рис. 2, точка 1);

2) предварительным снятием давления на контуре выработки (так называемый β -метод) до активации элементов обделки (рис. 2, точка 2), что позволяет моделировать развитие начальных деформаций незакрепленной выработки.

Первый способ не отражает реальное взаимодействие в системе «обделка — грунтовый массив» при проходке тоннеля, особенно на глубоком заложении, второй способ отличается неточностью в назначении коэффициента β — коэффициента снижения горного давления на контуре выработки (в настоящее время на кафедре «Тоннели» ведутся исследовательские работы, посвященные данному вопросу [7]). И в том и в другом случае в массиве формируется разное напряженно-деформированное состояние, которое характеризуется разными величинами горного давления на обделку.

Исходя из этого, предварительно было выдвинуто предположение о влиянии напряженного состояния массива в окрестности тоннельной выработки на величину добавочного давления в зависимости от способа моделирования проходки. Однако результаты моделирования показали, что величина добавочного давления практически не зависит от способа моделирования проходки (табл. 2).

Этот неочевидный вывод имеет высокую практическую ценность — возможность достаточно точно определить величину добавочного давления на обделку, не обладая всей полнотой знаний о способе ее проходке.

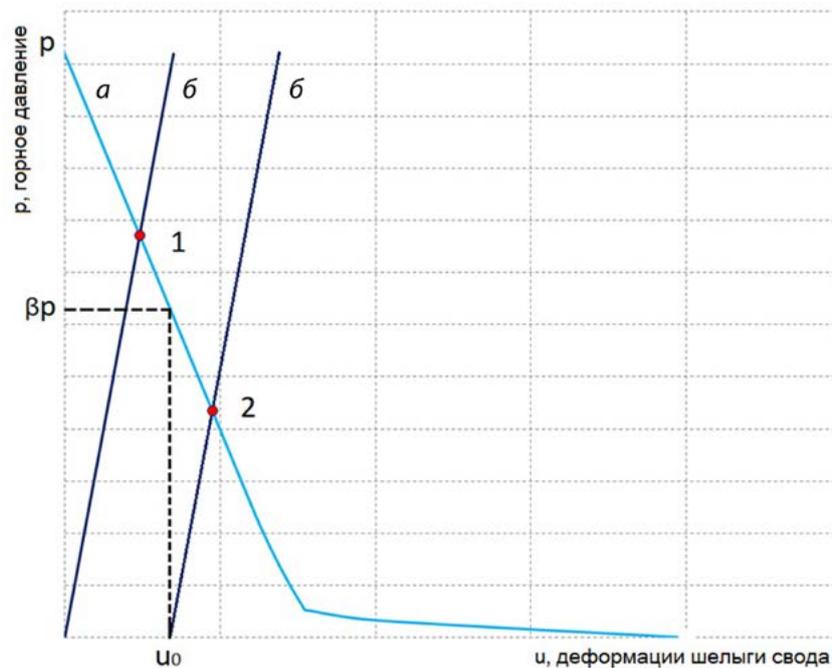


Рис. 2. Графики взаимодействия в системе «обделка — грунтовый массив»:
a — график равновесного состояния массива;
б — график линейно нарастающего сопротивления крепи

ТАБЛИЦА 2. Величина добавочного давления

№ модели	Расстояние от оси фундамента, м	Давление на обделку, т/м ²		Добавочное давление, т/м ²	Давление на обделку, т/м ²		Добавочное давление, т/м ²
		до возведения здания	после возведения здания		до возведения здания	после возведения здания	
		Нагрузка от полного веса столба грунта			Снятие давление на контуре выработки		
Глубокое заложение							
1	0	113,4	118,2	4,8	51,0	55,9	4,9
2	30		117,9	4,5		55,5	4,5
3	60		116,2	2,8		53,7	2,7
4	85		114,9	1,5		52,4	1,4
5	110		114,1	0,7		51,8	0,8
Мелкое заложение							
6	0	61,5	67,2	5,7	25,4	31,0	5,6
7	30		67,0	5,5		30,9	5,5
8	60		63,5	2,0		27,3	1,9
9	85		62,4	0,9		26,3	0,9
10	110		62,1	0,6		26,0	0,6

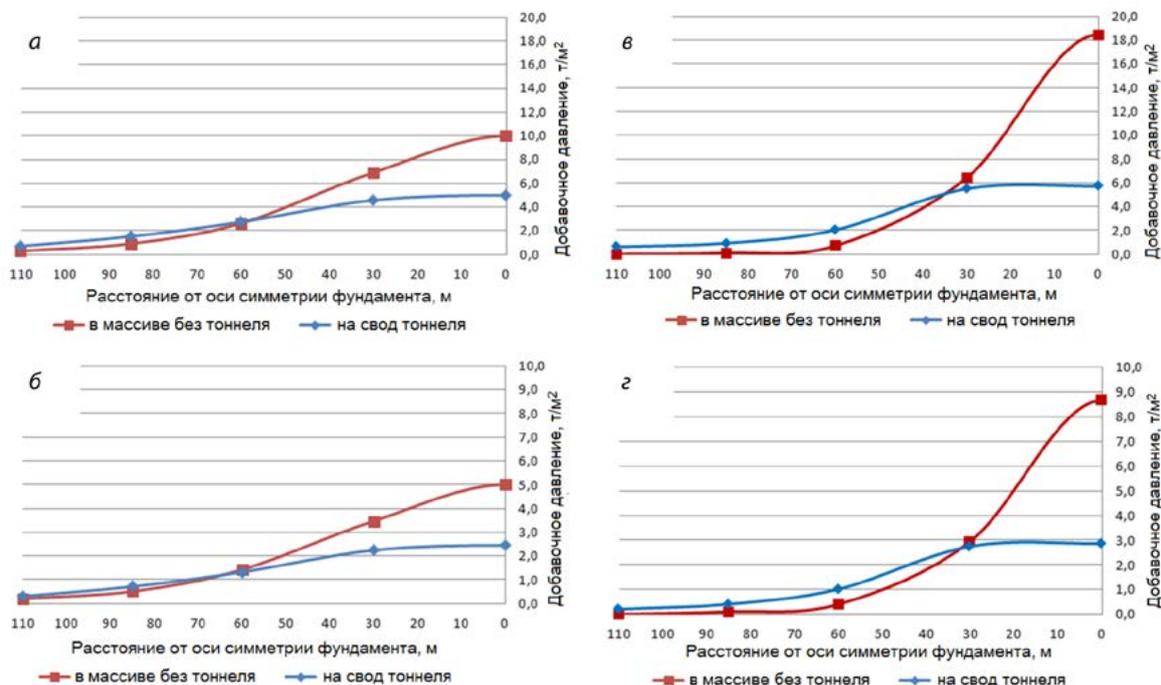


Рис. 3. Графики изменения добавочного давления:

- a* — на глубоком заложении при нагрузке 300 кПа по подошве фундамента;
- б* — на глубоком заложении при нагрузке 150 кПа по подошве фундамента;
- в* — на мелком заложении при нагрузке 300 кПа по подошве фундамента;
- г* — на мелком заложении при нагрузке 150 кПа по подошве фундамента

По результатам моделирования были построены графики распределения добавочного давления, представленные на рис. 3. Из них следует, что нагрузка по подошве фундамента определяет интенсивность добавочного давления, но не влияет на характер его распределения: графики *a* и *б*, а также *в* и *г* отличаются друг от друга исключительно значениями по оси ординат. То есть изменение добавочного давления прямо пропорционально изменению нагрузки. Эта зависимость сохраняется не только по глубине (что соответствует аналитическому подходу, закрепленному в СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», п. 5.6.32), но и на расстоянии от оси фундамента. Причем этот закон сохраняется при изменении любых других параметров: в разных моделях грунта и в разном напряженном состоянии системы «обделка — грунтовый массив», в ненарушенном грунтовом

массиве и в массиве, НДС которого изменено проходкой тоннеля.

В ненарушенном массиве, чье НДС не изменено проходкой тоннеля, распределение добавочного давления подчиняется следующему закону: пиковое значение добавочного давления по оси фундамента, затем затухание и асимптотическое приближение к нулю на расстоянии от оси. С глубиной меняется очертание графика затухания (см. рис. 3): более плавное на глубоком заложении (рис. 3, графики *a* и *б*) и более резкое на мелком (рис. 3, графики *в* и *г*).

Сравнивая графики добавочного давления для ненарушенного массива и для массива с тоннелем, можно сделать вывод, что проходка тоннеля вносит серьезные изменения в график распределения добавочного давления. По оси фундамента добавочное давление уменьшается в разы, в виду чего затухание становится более плавным.

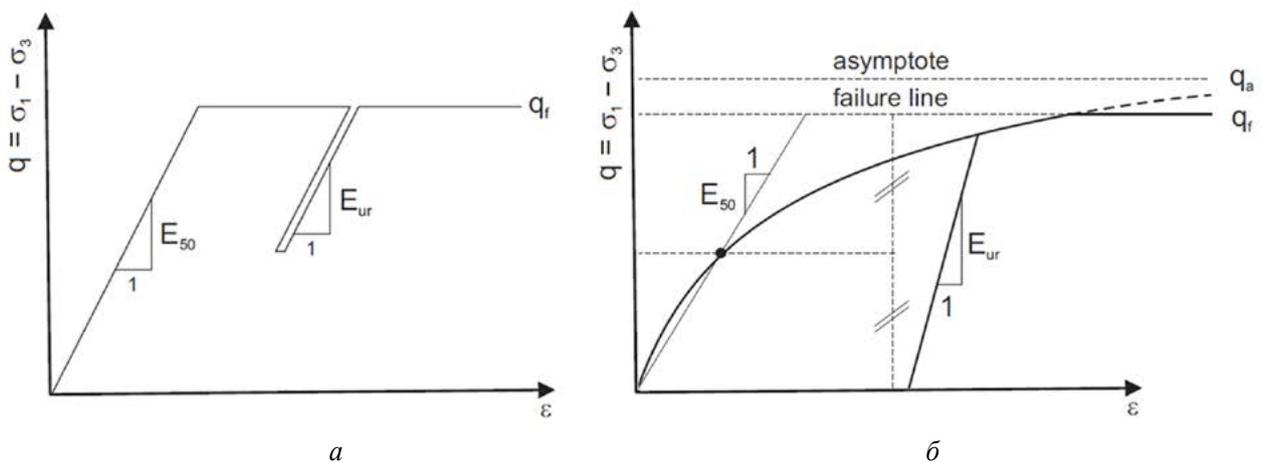


Рис. 4. Модели Мора — Кулона:
a — классическая; *б* — модифицированная

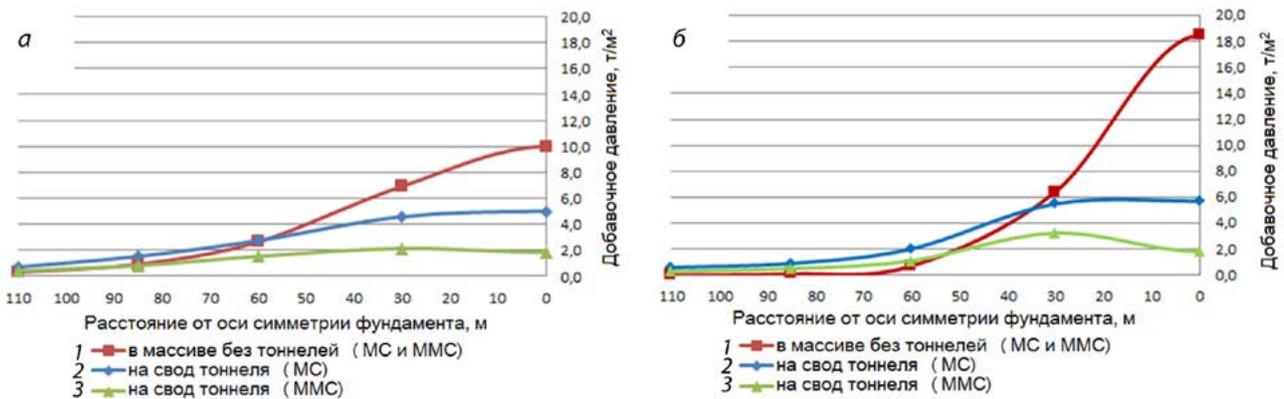


Рис. 5. Графики изменения добавочного давления:
a — на глубоком заложении при нагрузке 300 кПа по подошве фундамента;
б — на мелком заложении при нагрузке 300 кПа по подошве фундамента

На некотором расстоянии графики добавочного давления для нетронутого массива и для массива с тоннелем сближаются между собой.

На следующем этапе исследования выполнялась оценка влияния применяемой геомеханической модели грунта на распределение добавочного давления на тоннель. Модель Мора — Кулона (далее — модель МС), чаще всего применяемая в инженерных расчетах [8–10], использует один тип модуля упругости — секущий модуль упругости E_{50} , определяемый при достижении образца грунта половины разрушающих деформаций при испытаниях. Модуль упругости при разгрузке E_{ur} назначается таким же, что и при нагружении (рис. 4, *a*).

Модифицированная модель Мора — Кулона, иначе модель упрочняющего грунта (далее — модель ММС) [11–14], позволяет отдельно указывать модуль упругости при разгрузке E_{ur} , по умолчанию принимаемый равным трехкратному значению секущего модуля упругости: $E_{ur} = 3 \cdot E_{50}$ (рис. 4, *б*). В данных исследованиях геомеханические модели отличались главным образом этим показателем — модулем упругости при разгрузке.

На рис. 5 представлены графики распределения добавочного давления при использовании рассмотренных геомеханических моделей. При этом в ненарушенном массиве, когда при сооружении здания выполняется только нагружение,

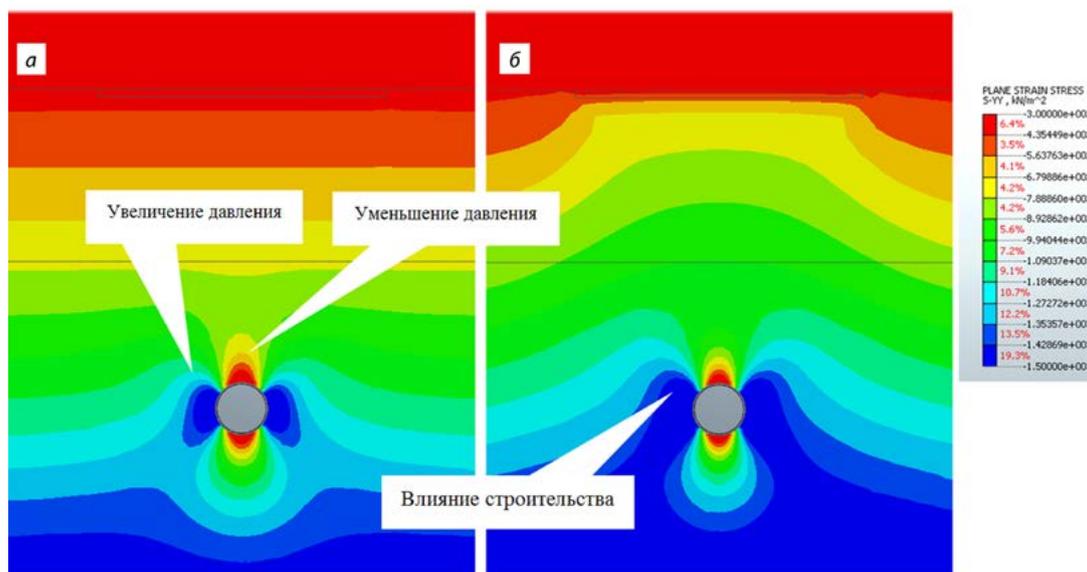


Рис. 6. Изменение изополей вертикальных напряжений в окрестности тоннельной выработки в результате наземного строительства: *a* — до строительства здания; *b* — после строительства здания

модели МС и ММС выдают практически одинаковые значения добавочного давления (рис. 5, кривые 1).

Проходка тоннеля связана с разгрузкой массива в окрестности сводовой части выработки, поэтому повторное нагружение, вызванное строительством здания, по разному интерпретируется в моделях МС (рис. 5, кривые 2) и ММС (рис. 5, кривые 3): в моделях ММС значения добавочного давления примерно вдвое меньше по сравнению с моделью МС. Также в модели ММС сближение графиков добавочного давления для ненарушенного массива и для массива с тоннелем на расстоянии от оси фундамента становится более заметным.

При анализе графиков распределения добавочного давления возникает два научных вопроса:

1. С чем связано значительное уменьшение добавочного давления по оси фундамента при проходке тоннеля по сравнению с добавочным давлением в ненарушенном массиве?

2. За счет чего в модифицированной модели Мора — Кулона происходит уменьшение добавочного давления по оси фундамента по отношению к добавочному давлению «под его краями»?

Этот эффект сильнее заметен на мелком заложении (рис. 5, *b*).

Объяснение этих наблюдаемых явлений — предмет дальнейших научных исследований и обсуждений. Предварительно можно вывести следующую гипотезу: большее значение добавочного давления воспринимает более нагруженная часть массива, а именно в боках тоннельной выработки, что можно наблюдать в виде сгущения изополей напряжений (рис. 6). При проходке тоннеля в результате процессов перераспределения напряжений (описанных в литературе, например [15]) в сводовой части тоннельной выработки происходит уменьшение напряжений, в то время как в боках выработки происходит концентрация вертикальных сжимающих напряжений, то, что профессор П. Луарди называл «арочным эффектом» (рис. 6, *a*). После строительства здания в распределение изополей привносится возмущение и область массива в боках тоннельной выработки воспринимает большую часть добавочного давления (рис. 6, *b*).

Это явление можно отразить графически на рис. 7. Графики добавочного давления для точек А следует интерпретировать как графики доба-

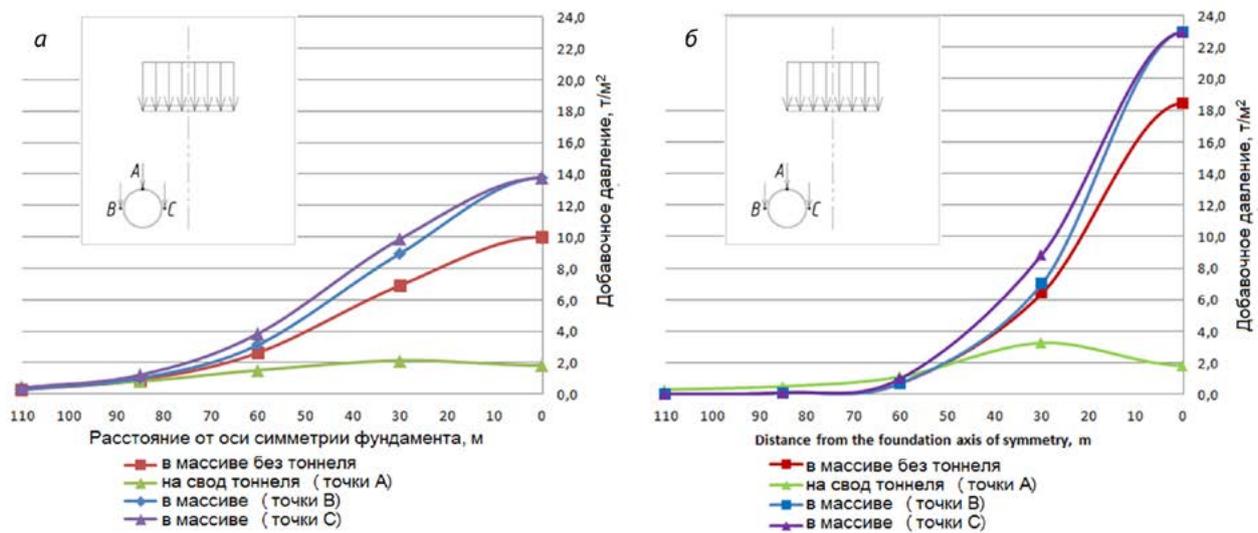


Рис. 7. Графики изменения добавочного давления (модель МСС):
 а — на глубоком заложении при нагрузке 300 кПа по подошве фундамента;
 б — на мелком заложении при нагрузке 300 кПа по подошве фундамента

вочного давления на тоннельную обделку, а для точек *B* и *C* — как графики добавочного давления для массива в боках выработки. Как видно из графиков, в то время как сводовая часть выработки воспринимает незначительную часть добавочного давления, по сравнению с добавочным давлением в нетронутым массиве, бока выработки концентрируют напряжения так же, как и при проходке тоннеля. По оси фундамента добавочное давление в точках *B* и *C* одинаково и превышает добавочное давление для нетронутого массива. По мере удаления тоннеля от оси фундамента добавочное давление в точках *B* и *C* становится неравномерным: сильнее нагружается ближняя к оси фундамента точка *C*, часть давления передается на свод в точку *A* (это объясняет небольшое увеличение добавочного давления «под краями» фундамента), затем во всех точках давление снижается и графики асимптотически приближаются к нулю.

В результате выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Было установлено, что в ненарушенном грунтовом массиве распределение добавочного

давления от наземного строительства подчиняется следующему закону:

- пиковое значение добавочного давления по оси фундамента, затем затухание и асимптотическое приближение к нулю на расстоянии от оси, при этом с глубиной меняется очертание графика затухания: более плавное на глубоком заложении и более резкое на мелком.

2. Проходка тоннеля вносит серьезные изменения в закон распределения добавочного давления:

- по оси фундамента добавочное давление уменьшается в разы, в виду чего затухание становится более плавным, на некотором расстоянии графики добавочного давления для нетронутого массива и для массива с тоннелем сближаются между собой.

3. В результате изменения в моделях величины нагрузки по подошве фундамента были выявлены следующие закономерности:

- изменение добавочного давления прямо пропорционально изменению нагрузки как по глубине, так и на расстоянии от оси фундамента;

- этот закон сохраняется при изменении любых других параметров: в ненарушенном грунтовом

массиве и в массиве, напряженно-деформированное состояние которого изменено проходкой тоннеля, в разном напряженном состоянии системы «обделка — грунтовый массив», в разных геомеханических моделях грунта.

4. В результате изменения в моделях параметров проходки тоннеля («мгновенная» активация элементов обделки или учет начальных деформаций контура незакрепленной выработки) были выявлены следующие закономерности:

– величина добавочного давления практически не зависит от способа моделирования проходки;

– из этого, в свою очередь, следует вывод о возможности достаточно точно определить величину добавочного давления на обделку, не обладая всей полнотой знаний о способе ее проходке.

5. В результате изменения применяемой геомеханической модели грунта были выявлены следующие закономерности:

– в ненарушенном массиве, когда при сооружении здания выполняется только нагружение, геомеханические модели МС и ММС выдают практически одинаковые значения добавочного давления;

– проходка тоннеля связана с разгрузкой массива в окрестности сводовой части выработки, поэтому повторное нагружение, вызванное строительством здания, по-разному интерпретируется в разных геомеханических моделях: в моделях ММС значения добавочного давления примерно вдвое меньше по сравнению с моделью МС, также в модели ММС сближение графиков добавочного давления для ненарушенного массива и для массива с тоннелем на расстоянии от оси фундамента становится более заметным.

Достоверность полученных выводов следует подтвердить дальнейшими исследованиями.

Библиографический список

1. Lediaev A. P. Influence evaluation of buildings constructed in protected zone on St. Petersburg subway under-

ground structures stress-strain state / A. P. Lediaev, A. N. Konkov, A. L. Novikov, D. A. Soloviev // *Transportation Geotechnics and Geoecology*, TGG 2017, 17–19 May 2017. — Saint Petersburg, Russia. — 2017. — Pp. 492–499. — DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.079.

2. Lediaev A. P. An assessment of the sewer tunnel stress-strain behavior during the reconstruction of an object of cultural heritage / A. P. Lediaev, V. N. Kavkazskiy, D. A. Grafov, D. A. Soloviev, A. V. Benin // *Key Trends in Transportation Innovation*, E3S Web of conferences, KTTI 2019. — 2020. — 02008. — DOI: 10.1051/e3sconf/202015702008.

3. Möller S. Ch. Tunnel induced settlements and structural forces in linings / S. Ch. Möller. — Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart. — 2006.

4. Vermeer P. A. On the ground response curve / P. A. Vermeer, T. Marcher, N. Ruse // *Felsbau*. — № 20(6). — 2002. — Pp. 19–24.

5. Schikora R. Berechnungsmethoden moderner bergmännischer Bauweisen beim U-Bahn-Bau / K. Schikora, T. Fink // *Bauingenieur*. — 1982. — № 57. — Pp. 193–198.

6. Ghorbani Ali. A comprehensive solution for the calculation of ground reaction curve in the crown and sidewalls of circular tunnels in the elastic-plastic-EDZ rock mass considering strain softening / Ali Ghorbani // *Tunnelling and Underground Space Technology*. — 2019. — Vol. 84. — Pp. 413–431. — DOI:10. 1016/j.tust. 2018.11.045.

7. Сокорнов А. А. Моделирование проходки тоннеля глубокого заложения в методе конечных элементов / А. А. Сокорнов, А. Н. Коньков // *Путевой навигатор*. — 2022. — № 50(76). — С. 36–44.

8. Chen W. An integrated numerical model for the stability of artificial submarine slope under wave load / W. Chen, G. Liu, Ya Li, G. Chen, D. Jeng et al. // *Coastal Engineering*. — 2020. — Vol. 158. — DOI: 10.1016/j.coastaleng.2020.103698.

9. Tornborg J. Modelling the construction and long-term response of Göta Tunnel / J. Tornborg, M. Karlsson, A. Kullingsjö, M. Karstunen // *Computers and Geotechnics*. — 2021. — Vol. 134. — DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104027.

10. Shah S. Numerical modelling of soil-nail and secant pile in Plaxis 2D: a case study of tomb of Jam Nizam-Al-Din

Samoo, Makkli Thatta / S. Shah, A. Kumar, T. Ali et al. // Civil and Environmental Engineering. — Vol. 17. — Iss. 2. — Pp. 706–717. — DOI: 10.2478/cee-2021-0070.

11. Ezzeldin I. Three-dimensional finite element modeling of corrugated metal pipes / I. Ezzeldin, Hany el Naggar // Transportation Geotechnics. — 2021. — Vol. 27. — DOI:10.1016/j.trgeo.2020.100467.

12. Agalianos A. Numerical analysis of surface foundation subjected to strike-slip faulting: model boundaries, pre-softening volumetric response, parametric study / A. Agalianos, I. Anastasopoulos // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. — 2021. — Vol. 151. — DOI:10.1016/j.soildyn.2021.106979.

13. Gavin K. A review of CPT based axial pile design in the Netherlands / K. Gavin, M. S. Kovacevic, D. Igoe // Underground Space. — Vol. 6. — Iss. 1. — 2021. — DOI: 10.1016/j.undsp.2019.09.004.

14. Mohsan M. On the use of different constitutive models in data assimilation for slope stability / M. Mohsan,

P. J. Vardon, F. C. Vossepoel // Computers and Geotechnics. — 2021. — Vol. 138. — DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104332.

15. Lunardi P. Design and construction of tunnels. Analysis of controlled deformation in rocks and soils (ADECO-RS) / P. Lunardi // Springer Verlag Berlin Heidelberg. — 2008.

Дата поступления: 04.05.2022

Решение о публикации: 17.05.2022

Контактная информация:

СОКОРНОВ Антон Александрович — старший преподаватель; scarlunch@mail.ru

КОНЬКОВ Александр Николаевич — канд. техн. наук, доцент; ankonkov@yandex.ru

НОВИКОВ Анатолий Леонидович — старший преподаватель; snoval@yandex.ru

БЕНИН Андрей Владимирович — канд. техн. наук, заведующий ИЛ «Механическая лаборатория им. проф. Н. А. Белелюбского»;

benin.andrey@mail.ru

Factors Affecting Additional Pressure Distribution from Ground Construction on Subway Tunnels

A. A. Sokornov, A. N. Konkov, A. L. Novikov, A. V. Benin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Sokornov A. A., Konkov A. N., Novikov A. L., Benin A. V. Factors Affecting Additional Pressure Distribution from Ground Construction on Subway Tunnels // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 367–377. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-367-377

Summary

Purpose: To analyze the factors affecting pressure distribution from ground construction on subway tunnel linings. **Method:** Mathematical modeling by finite element method of a system that includes a soil massif, an interstation tunnel lining and a load from ground building foundation. **Results:** The type of additional pressure distribution graph from ground construction in inviolate massif and in the massif, which stress-strain state is distorted by tunneling, is established. It is found that the change of additional pressure is directly proportional to load change as by depth as well as by distance from foundation axis; this law is preserved at any other parameter change (in inviolate soil massif and in the massif which stress-strain state is changed by tunneling, at various ways of tunneling modeling, at the use of various geomechanical soil models). It is established that the value of additional pressure from ground construction practically doesn't depend on tunneling modeling method. The difference between the results at soil description via Mohr-Coulomb model and via its modification is substantiated. **Practical importance:** It is shown the possibility to determine accurately the amount of additional pressure from ground construction on tunnel lining without having information on tunneling method.

Keywords: Subway tunnels, ground pressure, stress-strain, soil massif, finite element method.

References

1. Lediaev A. P., Konkov A. N., Novikov A. L., Soloviev D.A. Influence evaluation of buildings constructed in protected zone on St. Petersburg subway underground structures stress-strain state. *Transportation Geotechnics and Geocology*. May 17-19, 2017. St. Petersburg, Russia. 2017, pp. 492-499. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.079.
2. Lediaev A. P., Kavkazskiy V. N., Grafov D. A., Soloviev D. A., Benin A. V. An assessment of the sewer tunnel stress-strain behavior during the reconstruction of an object of cultural heritage. *Key Trends in Transportation Innovation, E3S Web of conferences, KTTI 2019*. 2020. 02008. DOI: 10.1051/e3sconf/202015702008.
3. Möller S. Ch. Tunnel induced settlements and structural forces in linings. *Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart*. 2006.
4. Vermeer P. A., Marcher T., Ruse N. On the ground response curve. *Felsbau*. 2002, I. 20 (6), pp. 19–24.
5. Schikora R, Fink T. Berechnungsmethoden moderner bergmännischer Bauweisen beim U-Bahn-Bau. *Bauingenieur*. 1982, I. 57, pp. 193–198.
6. Ghorbani Ali. A comprehensive solution for the calculation of ground reaction curve in the crown and sidewalls of circular tunnels in the elastic-plastic-EDZ rock mass considering strain softening. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 84, pp. 413-431. DOI: 10.1016/j.tust.2018.11.045.
7. Sokornov A. A. Modelirovanie prokhodki tonnelya glubokogo zalozheniya v metode konechnykh elementov [Simulation of deep tunneling in the finite element method]. *Putevoy navigator* [Travel navigator]. 2022, I. 50 (76), pp. 36-44. (In Russian)
8. Weiyun Chen, Ghenglin Liu, Ya Li, Guoxing Chen, Dongsheng Jeng, Shencong Liao, Jin Yu. An integrated numerical model for the stability of artificial submarine slope under wave load. *Coastal Engineering*. 2020, vol. 158. DOI:10.1016/j.coastaleng.2020.103698.
9. Tornborg J, Karlsson M., Kullingsjö A., Karstunen M. Modelling the construction and long-term response of Göta Tunnel. *Computers and Geotechnics*. 2021, vol. 134. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104027.
10. Shah S., Kumar A., Ali T., Hakro M., Zardari M. Numerical modelling of soil-nail and secant pile in Plaxis 2D: a case study of tomb of Jam Nizam-Al-Din Samoo, Makkli Thatta. *Civil and Environmental Engineering*. 2021, vol. 17, I. 2, pp. 706-717. DOI: 10.2478/cee-2021-0070.
11. Ezzeldin I., Hany el Naggar. Three-dimensional finite element modeling of corrugated metal pipes. *Transportation Geotechnics*. 2021, vol. 27. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100467.
12. Agalianos A., Anastasopoulos I. Numerical analysis of surface foundation subjected to strike-slip faulting: model boundaries, pre-softening volumetric response, parametric study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2021, vol. 151. DOI:10.1016/j.soildyn.2021.106979.
13. Gavin K., Kovacevic M. S., Igoe D. A review of CPT based axial pile design in the Netherlands. *Underground Space*. 2021, vol. 6, I. 1. DOI:10.1016/j.undsp.2019.09.004.
14. Mohsan M., Vardon P. J., Vossepoel F. C. On the use of different constitutive models in data assimilation for slope stability. *Computers and Geotechnics*. 2021, vol. 138. DOI:10.1016/j.compgeo.2021.104332.
15. Pietro Lunardi. Design and construction of tunnels. Analysis of controlled deformation in rocks and soils (ADECO-RS). Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

Received: May 04, 2022

Accepted: May 17, 2022

Author's information:

Anton A. SOKORNOV — Senior Lecturer;
scarlunch@mail.ru

Alexandr N. KONKOV — PhD in Engineering,
Associate Professor; ankonkov@yandex.ru

Anatoliy L. NOVIKOV — Senior Lecturer;
snoval@yandex.ru

Andrey V. BENIN — PhD in Engineering,
Head of «Prof. N. A. Belolyubsky Mechanical
Laboratory»; benin.andrey@mail.ru