

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНОГО ГРУНТОВОГО МАССИВА НА ЕГО УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТОННЕЛЕЙ ЩИТОВЫМИ ПРОХОДЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ С ПРИГРУЗОМ ЗАБОЯ

Протосеня А.Г., Кумов В.В.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: тоннелепроходческие щиты, пригруз забоя, зона сдвижений массива, глубина заложения, многослойный массив грунта, строительство тоннелей.

Аннотация. В статье проведено исследование влияния структуры забоя тоннеля на устойчивость многослойных грунтов при строительстве тоннелей щитовыми проходческими комплексами с пригрузом забоя. Актуальность исследования обусловлена необходимостью уменьшения воздействия подземного строительства в условиях плотной городской застройки на окружающую среду и земную поверхность. Для этого проведено численное моделирование на основе метода конечных элементов, учитывающее геолого-структурные условия, аналогичные условиям строительства метрополитенов в Санкт-Петербурге при различных глубинах заложения тоннеля. Результаты моделирования представлены в виде картин и графиков, отражающих влияние структуры многослойного массива грунта в забое на его сдвижения при наличии ослабленного или усиленного слоя. В заключении описано формирование площади зоны сдвижения многослойного грунтового массива в зависимости от изменения его структуры в забое тоннеля при различной глубине заложения тоннеля.

INFLUENCE OF SOIL MASS STRUCTURE ON ITS STABILITY DURING TUNNEL CONSTRUCTION BY SHIELD TUNNELING COMPLEXES IN MIXED FACES

Protosenya A.G., Kumov V.V.

Saint-Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Saint-Petersburg

Keywords: tunneling shields, bottom face loading, massif shear zone, embedment depth, multilayer soil massif, tunnel construction.

Abstract. The article studies the influence of the tunnel face structure on the stability of multilayer soils during tunnel construction by shield tunnel boring complexes with face loading. The relevance of the study is conditioned by the necessity to reduce the impact of underground construction in the conditions of dense urban development on the environment and the earth surface. For this purpose numerical modeling based on the finite element method has been carried out, taking into account geological and structural conditions similar to the conditions of subway construction in Saint-Petersburg at different tunnel embedment depths. The modeling results are presented in the form of pictures and graphs reflecting the influence of the structure of the multilayer soil mass in the face on its shear in the presence of a weakened or reinforced layer. In conclusion, the formation of the area of the shear zone of the multilayer soil massif depending on the change of its structure in the tunnel face at different depths of tunnel embedment is described.

Введение. Наиболее важный вопрос при строительстве подземной инфраструктуры городов – снижение влияния подземных работ на земную поверхность, в также на располагающиеся на ней памятники культуры, здания и сооружения [1-3]. Для исключения возможности нанесения вреда земной поверхности необходим наиболее точный прогноз влияния строительства с учетом геологических и гидрогеологических особенностей массива и технологических параметров строительства [4, 5].

Учет природных и техногенных факторов стоит на лидирующих позициях при прогнозе влияния строительства на окружающий его массив грунта [6-8]. В последние десятилетия технологии строительства ушли далеко вперед, благодаря чему снизилось и их негативное воздействие на грунтовой массив [9].

Сейчас при строительстве тоннелей теоретически безосадочными технологиями при достаточно точном учете геологии и гидрогеологии можно считать технологии строительства механизированными щитовыми проходческими комплексами с пригрузом забоя [10, 11].

Технология позволяет создать баланс между давлением со стороны грунтового массива на забой и давлением пригруза, что при осуществлении точного прогноза позволяет исключить влияние строительства тоннеля на окружающий его грунтовой массив [12, 13].

В Санкт-Петербурге глубина заложения перегонных тоннелей метрополитена может значительно варьироваться. Недостаточный учет этого фактора может привести к техногенным авариям. Оценка размеров части массива перед забоем тоннеля, оказывающей на него давление позволит наиболее точно определить необходимое для создания баланса давление пригруза на забой [14-17].

Выбор характеристик для создания численных моделей играет особенно важную роль для наиболее верной передачи между натурой и моделью нагрузок, деформаций и перемещения грунтового массива [18, 19].

В статье представлено влияние структуры грунтового массива на его сдвигения в призабойной зоне тоннеля при различных глубинах заложения тоннеля. Выбор критерия глубины заложения при этом играет особо важную роль, ведь он является одним из основных при расчете напряженно-деформированного состояния массива в окрестностях горной выработки.

На сегодняшний день для прогноза влияния строительства на окружающий его грунтовой массив используют физическое и численное моделирование. Появление численного моделирования значительно упростило задачу прогноза за счет намного меньших трудоемкости и стоимости разработки моделей [20].

Численные методы, такие как метод конечных разностей, граничных условий и конечных элементов, часто применяются для решения задач геомеханики [21-23].

Цель исследования заключается в изучении влияния глубины заложения тоннеля на устойчивость многослойного грунтового массива в забое двухпутного тоннеля метрополитена в условиях строительства, подобных Санкт-Петербургу. Анализ результатов численного моделирования, представлен в виде картин и графиков влияния структуры многослойного грунтового массива в забое тоннеля на его сдвигения при наличии ослабленного или усиленного слоя.

Для моделирования геомеханической задачи критически важно выбрать подходящий программный комплекс из широкого спектра доступных на сегодняшний день. В исследовании выбран программный комплекс, обладающий широкими возможностями для моделирования различных моделей поведения грунтового массива.

Моделирование в трехмерной постановке задачи с использованием специализированного программного комплекса позволяет наиболее точно определить деформированное состояние массива грунта при строительстве в нем подземных сооружений [24, 25].

Метод численного моделирования

Модель включает в себя тоннель, находящийся в четвертичном структурном слое. Геологические условия в Санкт-Петербурге, принятые в качестве примера, подразумевают мощность этого слоя от 20 м до 90 м, и практически горизонтальное его залегание [26].

Физико-механические характеристики и структурно-геологические условия грунта в Санкт-Петербурге резко различаются по своим значениям и характеристикам. Модель мощностью от 35 м до 95 м включает следующие инженерно-геологические элементы: песок, слой с изменяемыми свойствами и плотный песок.

Для точности расчетов выбрана модель упрочняющегося грунта *Hardening Soil*, способная учитывать нелинейные деформации от напряжений, упрочнение при сжатии и сдвиге, а также дилатансию и контракцию при моделировании дискретных сред.

При разработке двух основных сценариев моделирования для исключения влияния на результат моделирования различных физико-механических характеристик перемещаемого слоя, отличающихся от свойств вмещающего слоя, выбран параметр φ – угол внутреннего

трения грунта, оказывающий наибольшее влияние на изменение деформированного состояния многослойного грунтового массива в забое тоннеля.

Для моделирования особенно важен выбор необходимых диапазонов значений деформационных и прочностных характеристик массива, отличающихся своим многообразием [27-29]. Физико-механические характеристики вмещающего слоя взяты из практики строительства тоннелей в Санкт-Петербурге.

Для моделирования строительства перегонного тоннеля выбраны следующие параметры: давление пригруза 90 кН/м^2 с линейным увеличением на 15 кН/м^2 на метр высоты пригруза; давление тампонажа 100 кН/м^2 , увеличивающееся с линейным увеличением на 20 кН/м^2 на метр высоты раствора; давление домкратов 640 кН/м^2 ; внешний диаметр обделки тоннеля $8,5 \text{ м}$; толщина крепи $0,25 \text{ м}$; ширина колец обделки $1,5 \text{ м}$; тоннель залегает на глубине от $20,5 \text{ м}$ до $80,5 \text{ м}$ от земной поверхности.

Ряд конечно-элементных моделей построен в трехмерной постановке симметрично относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось тоннеля.

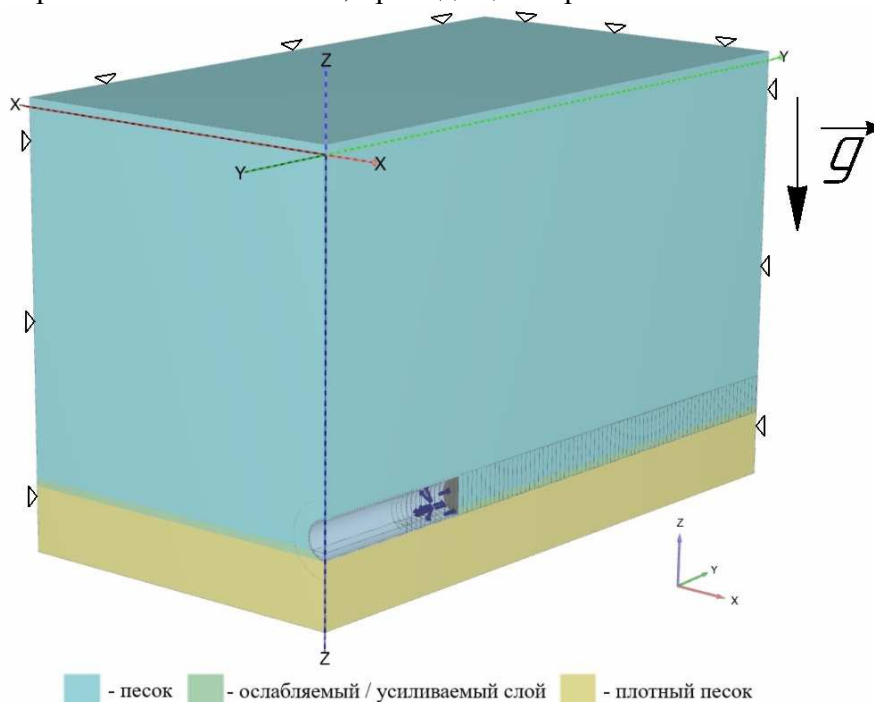


Рис. 1. Численная модель в трехмерной постановке симметрично относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось тоннеля

В конечно-элементных моделях установлены следующие граничные условия: верхняя поверхность имеет свободное перемещаться во всех трех направлениях; боковые поверхности не перемещаются в направлениях, по нормали к ним; нижняя плоскость не перемещается в вертикальном направлении; обеспечена непрерывная передача напряжений и деформаций на контакте между слоями.

Выбранные технические параметры определены с целью соблюдения условий минимизации вертикальных сдвижений земной поверхности, не превышающих 5 мм , что крайне важно при строительстве в густонаселенных городских районах [30]. На рисунке 2 показана расчетная схема численной модели. Для изучения влияния структуры многослойного грунтового массива в забое тоннеля на его сдвижения при изменении глубины заложения перегонного тоннеля в модель введены два основных слоя грунта: горизонтальный слой с изменяемыми характеристиками и положением в массиве, а также горизонтальный слой с постоянными характеристиками. Слой грунта толщиной $0,2$ от диаметра тоннеля был выбран как изменяемый для его последующего перемещения от почвы к своду тоннеля.

В ходе исследования рассматривается два варианта отличия изменяющегося слоя грунта от вмещающего массива грунта: слой с меньшим значением угла внутреннего трения φ по

сравнению с вмещающим слоем (φ_0) и равным $0,7\varphi_0$; слой с большим значением угла внутреннего трения φ по сравнению с вмещающим слоем (φ_0) и равным $1,3\varphi_0$.

Процесс моделирования разделен на несколько этапов в зависимости от расположения перемещаемого слоя грунта: I – в почве тоннеля; II – в центре тоннеля; III – в своде тоннеля.

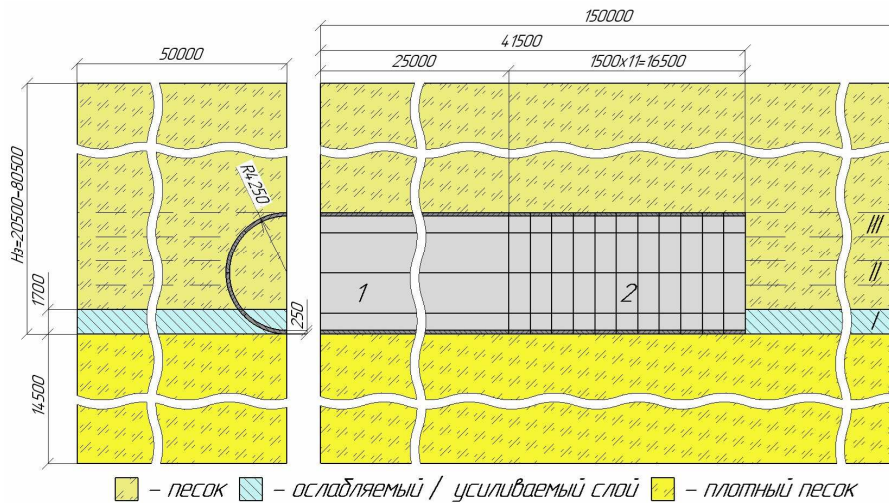


Рис. 2. Расчетная схема строящегося тоннеля: 1 – протяженная часть тоннеля; 2 – шаги моделирования строящегося тоннеля; I, II, III – положения изменяемого слоя в почве, центре, своде тоннеля

Обсуждение результатов исследования

Для получения наиболее полной картины формирования зоны сдвижения грунтового массива и влияния на неё различной структуры многослойного грунтового массива в забое тоннеля рассматривается критерий глубины заложения тоннеля. В статье влияние изменения данного критерия на площадь зоны горизонтальных сдвижений грунтового массива равными 3 мм вглубь тоннеля от плоскости забоя рассмотрено при различной структуре грунтового массива.

При одинаковых физико-механических характеристиках между рассматриваемыми слоями грунта разница в показателях отсутствует, что подтверждает достоверность процесса моделирования при сравнении результатов.

Результаты моделирования представлены в виде картин изменения горизонтальных сдвижений многослойного грунтового массива величиной в 3 мм вглубь тоннеля от его структуры при изменяющейся глубине заложения тоннеля в случае усиленного и ослабленного слоя грунта (рис. 3). Площади горизонтальных сдвижений грунтового массива отображены в виде значений для усиленного слоя грунта S_{iu} (над чертой) и ослабленного слоя грунта S_{io} (под чертой).

При обладании слоем грунта углом внутреннего трения, равным $0,7\varphi_0$ с увеличением глубины заложения тоннеля происходит увеличение площади зоны сдвижений грунтового массива в призабойной зоне тоннеля вглубь выработки (рис. 3). Разница в значениях при неизменной структуре массива достигает 67%. При неизменной глубине и различной структуре массива при наличии в забое ослабленного слоя грунта разница в значениях достигает 13%.

При заданных параметрах площадь зоны сдвижения грунтового массива достигает наибольших величин при залегании ослабленного слоя грунта в центре сечения строящегося тоннеля и равняется $118,4 \text{ м}^2$.

Наименьшая величина сдвижений в 3 мм вглубь тоннеля от плоскости забоя наблюдается при глубине заложения тоннеля в 20,5 м и равняется 0. Во всех рассматриваемых случаях при заданных физико-механических характеристиках грунта и технологических параметрах проходческого механизированного щита при глубине заложения тоннеля в 20,5 м наибольшее значение сдвижений грунта вглубь тоннеля от забоя выработки составляет 2 мм.

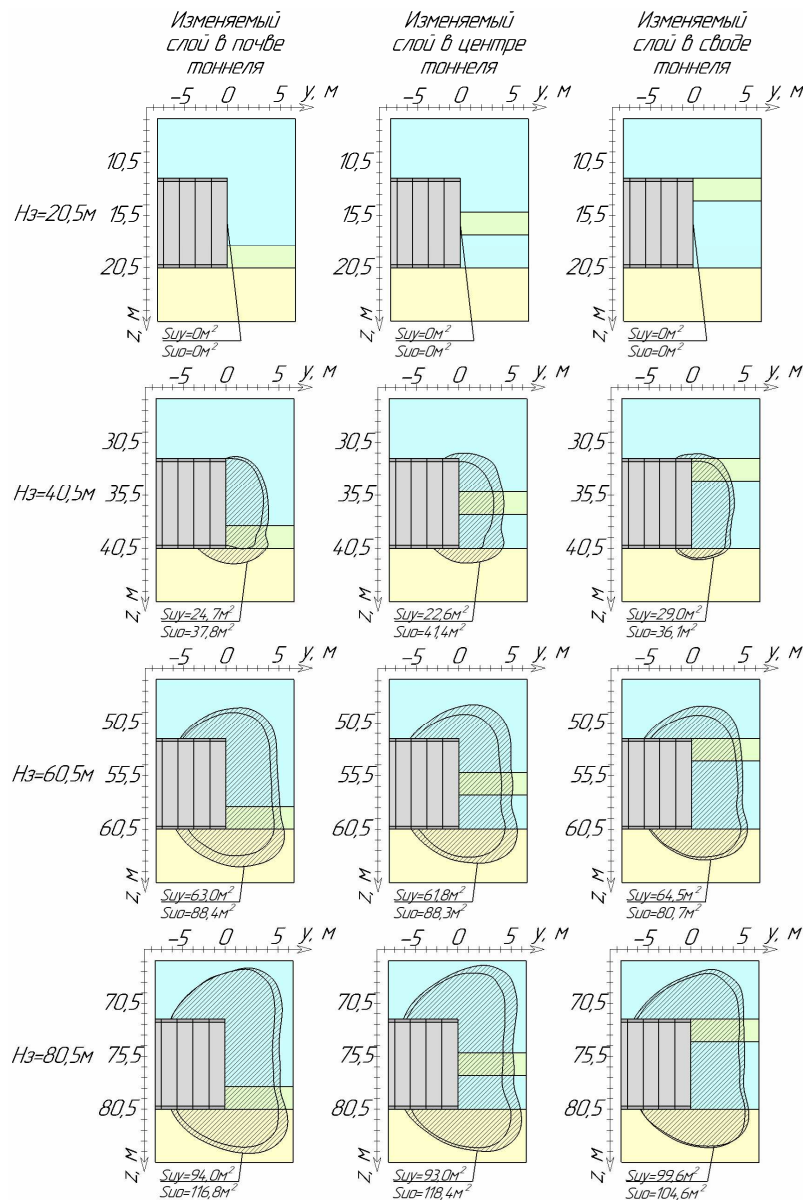


Рис. 3. Картины изменения горизонтальных сдвижений многослойного грунтового массива от его структуры в забое тоннеля при изменяющейся глубине заложения тоннеля в случае усиленного и ослабленного слоя грунта

При залегании ослабленного слоя в забое тоннеля с возрастанием глубины заложения тоннеля форма горизонтальных сдвижений грунтового массива в призабойной зоне совершает переход от эллипса, хордой которого является плоскость забоя, к полуокружности, в которой забой находится на расстоянии $1/4$ диаметра полуокружности от её геометрического центра.

При обладании слоем грунта углом внутреннего трения, равным $1,3\varphi_0$ с возрастанием глубины заложения тоннеля происходит увеличение площади зоны сдвижений грунтового массива в призабойной зоне тоннеля вглубь выработки (рис. 3). Разница в значениях при неизменной структуре массива достигает 76%. При неизменной глубине и различной структуре массива при наличии в забое усиленного слоя грунта разница в значениях достигает 22%.

При заданных параметрах площадь зоны сдвижения грунтового массива достигает наибольших величин при залегании усиленного слоя грунта в своде строящегося тоннеля и равняется $99,6 \text{ м}^2$.

Аналогично предыдущему случаю наименьшая величина сдвижений наблюдается при глубине заложения тоннеля в $20,5 \text{ м}$ и равняется 0. Наибольшее значение сдвижений грунта вглубь тоннеля от забоя выработки при наличии в забое усиленного слоя составляет 2 мм .

Характер изменения формы зоны сдвижений грунтового массива в призабойной зоне аналогичен случаю с наличием в забое ослабленного слоя.

На основе результатов численного моделирования построены графики зависимости площади сдвижения грунтового массива от различных вариантов структуры грунтового массива, представленных на рисунках 1 и 2, при заданных диапазонах значений деформационных и прочностных характеристик грунта (рис. 4).

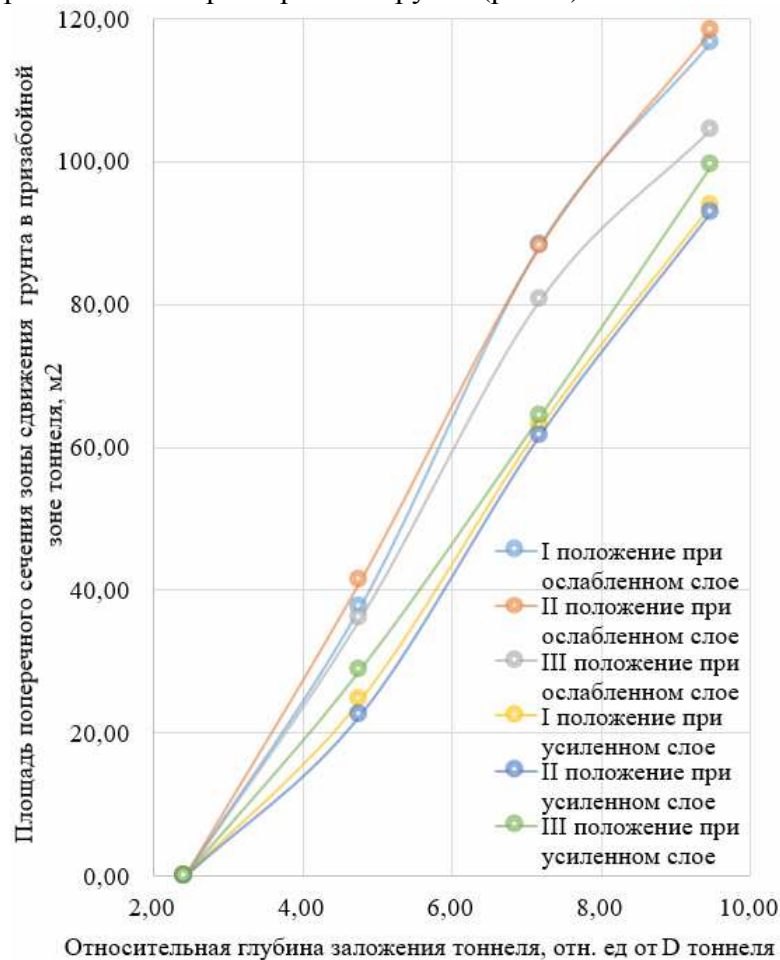


Рис. 4. График зависимости площади зоны горизонтальных сдвижений многослойного грунтового массива от глубины заложения тоннеля при различной структуре массива в забое тоннеля в случае усиленного и ослабленного слоя грунта

Согласно графику на рисунке 4 при обладании слоем грунта углом внутреннего трения, равным $0,7\varphi_0$ изменение размеров зоны сдвижений грунтового массива в призабойной зоне при различной структуре массива увеличивается с возрастанием глубины заложения тоннеля с 0% до 12%. При залегании ослабленного слоя в своде тоннеля разница в значениях с двумя прочими случаями наибольшая и составляет 12% при глубине заложения тоннеля в 80,5 м.

При залегании усиленного слоя грунта изменение размеров зоны сдвижений грунтового массива в призабойной зоне при различной структуре массива составляет от 0% до 22%. При залегании усиленного слоя в своде тоннеля на всех глубинах наблюдается превышение значений площади зоны сдвижений грунтового массива в сравнении с залеганием усиленного слоя в почве и центре сечения тоннеля.

Заключение

В ходе исследования определено влияние структуры многослойного массива грунта при различных глубинах залегания тоннеля на площадь сдвижений грунтового массива в призабойной зоне тоннеля.

Для определения влияния построен ряд численных конечно-элементных моделей с заданными геологическими и технологическими параметрами (рис. 1, 2).

По результатам проведенного численного моделирования построены картины и графики влияния структуры многослойного грунтового массива в забое тоннеля на форму и размер зоны сдвижений массива при обладании слоем грунта углом внутреннего трения большим ($1,3\varphi_0$) или меньшим ($0,7\varphi_0$) вмещающему массиву.

Анализ результатов численного моделирования показал, что:

– с увеличением глубины заложения тоннеля происходит увеличение площади зоны сдвижений грунтового массива в призабойной зоне тоннеля вглубь выработки (рис. 3, 4);

– при наличии в забое ослабленного слоя грунта наибольшая разница в значениях площади сдвижения грунтового массива на заданном диапазоне глубин заложения тоннеля достигает 67%, а при наличии усиленного слоя грунта 76%;

– при неизменной глубине и различной структуре массива с наличием в забое ослабленного слоя грунта разница в значениях достигает 13% на глубине заложения тоннеля равной 80,5 м, а при наличии усиленного слоя грунта 22%;

– площадь зоны сдвижения грунтового массива достигает наибольших величин при залегании ослабленного слоя грунта в центре сечения строящегося тоннеля и равняется $118,4 \text{ м}^2$;

– возрастание глубины заложения тоннеля приводит к изменению формы горизонтальных сдвижений грунтового массива в призабойной зоне от эллипса, хордой которого является плоскость забоя, к полуокружности, в которой забой находится на расстоянии $1/4$ диаметра полуокружности от её геометрического центра;

– при наличии в забое ослабленного слоя грунта изменение размеров зоны сдвижений грунтового массива в призабойной зоне при различной структуре массива увеличивается с возрастанием глубины заложения тоннеля с 0% до 12%;

– при наличии в забое усиленного слоя грунта площадь зоны сдвижения грунтового массива достигает наибольших величин при залегании усиленного слоя грунта в своде строящегося тоннеля и равняется $99,6 \text{ м}^2$;

– характер изменения формы зоны сдвижений грунтового массива в призабойной зоне аналогичен случаю с наличием в забое ослабленного слоя грунта.

– при залегании усиленного слоя в своде тоннеля на всех глубинах наблюдается превышение значений площади зоны сдвижений грунтового массива в сравнении с залеганием усиленного слоя в почве и центре сечения тоннеля.

Список литературы

1. Zhang W., Li H., Wu C., Ly Y. Soft computing approach for prediction of surface settlement induced by earth pressure balance shield tunneling // *Underground Space*. 2021, vol. 6, pp. 353-363. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.12.003.
2. Zhao S., Li S., Wan Z., Wang X. Effects of anti-clay agents on bubble size distribution and stability of aqueous foam under pressure for earth pressure balance shield tunneling // *Colloid And Interface Science Communications*. 2021, vol. 42, p. 100424. DOI: 10.1016/j.colcom.2021.100424.
3. Liu J., Tan Y., Song X., Fan D., Liu T. Effects of through-wall leaking during excavation in waterrich sand on lateral wall deflections and surrounding environment // *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*. 2023, vol. 57, no. 3, pp. 530-541. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2023.03.011.
4. Dang T., Meschke G. Influence of muck properties and chamber design on pressure distribution in EPB pressure chambers - Insights from computational flow simulations // *Tunnelling And Underground Space Technology*. 2020, vol. 99, p. 103333. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103333.
5. Fei P., Ma S. Analysis of experimental data on the effect of double-line parallel shield tunneling on the deformation of adjacent buildings // *Alexandria Engineering Journal*. 2021, vol. 60, pp. 3957-3963. DOI: 10.1016/j.aej.2021.02.034.
6. Дашко Р.Э., Коробко А.А. Инженерно-геологическое обоснование безопасности строительства и эксплуатации сооружений различного назначения в пределах Предглинтовой изменности (Западная часть Ленинградской области) // *Записки Горного института – 2013. – Т. 206. – С. 95-100.*
7. Zhou X., Zhai S. Estimation of the cutterhead torque for earth pressure balance TBM under mixed-face conditions // *Tunnelling And Underground Space Technology*. 2018, vol. 74, pp. 217-229. DOI: 10.1016/j.tust.2018.01.025.
8. Ochmanski M., Spacagna R., Modoni G. 3D numerical simulation of consolidation induced in soft ground by EPB technology and lining defects // *Computers And Geotechnics*. 2021, vol. 128, p. 103830. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103830.

9. Мартиросянц Е. Показатели устойчивости обнажений протерозойских глин в забоях тоннелей // Записки Горного Института – 2009. – Т. 180. – С. 87-91.
10. Novozhenin S.U., Vystrcil M.G New Method of Surface Settlement Prediction for Saint-Petersburg Metro Escalator Tunnels Excavated by EPB TBM // Procedia Engineering. 2016, vol 150, pp. 2266-2271. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.283.
11. Мазеин С.В., Потапов М.А. Измерение давления пеногрунтовой компенсации в забое тоннелепроходческого щита для прогноза аварийных ситуаций техногенного характера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – №9. – С. 245-250.
12. Liu X., Xu S., Huang Y. Optimal control for earth pressure balance of shield machine based on action-dependent heuristic dynamic programming // ISA Transactions. 2019, vol. 94, pp. 28-35. DOI: 10.1016/j.isatra.2019.04.007.
13. Liu X., Xu S., Shao C. Optimal control of earth pressure balance of shield tunneling machine based on dual-heuristic dynamic programming // Optimal Control Applications and Methods. 2020, vol. 41, pp. 1510-1523. DOI: 10.1002/oca.2612.
14. Поляков А.В., Жабин А.Б., Чеботарев П.Н., Хачатурян В.Г. Особенности проектирования щитовых машин с грунтопригрузом // Известия ТулГУ. – 2019. – Вып. 4. – С. 150-156.
15. George J. Tsekouras, John Kukulis, Maria-Katerina Nikolinaku, Nikos E. Mastorakis. Prediction of Face Settlement During Tunneling Excavation Using Artificial Neural Network // Proceedings of the WSEAS International Conference on engineering mechanics, structures, engineering geology (emeseg '08). – Cambridge: Cambridge University, 2008. – P. 33-39.
16. Jiankang L., Yujing C. and Osama S. Influence of geological conditions of rock mass ahead of tunnel face on the prediction performance of uniaxial compressive strength prediction model // IOP Conference Series: Earth and Environment Science. 2021, vol. 861, no. 4, p. 042116. DOI: 10.1088/1755-1315/861/4/042116.
17. Kang-Hyun L., Hyung-Joon S., Park J., Park J., In-Mo L. Probabilistic estimation of predicting the state of the soil in front of TBM tunnels, combining each method of geophysical forecasting. // Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association. 2016, vol. 18, iss. 3, pp. 257-272. DOI: 10.9711/KTAJ.2016.18.3.257.
18. Алексеев А.В., Вербило П.Э., Протосеня А.Г. Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 252-260. – DOI: 10.31897/PMI.2022.26.
19. Карасев М.А. Анализ причин деформации земной поверхности и характер формирования мульды оседания, вызванной строительством транспортных тоннелей // Записки Горного Института. – 2011. – Т. 190. – С. 163-171.
20. Ignatiev S., Sudarikov A.E., Imashev A.J. Determination of the stress-strain state of a rock mass and a zone of inelastic deformations around an underground mine using modern numerical modeling methods // Journal of Sustainable Mining. 2021, vol. 20, iss. 3, pp. 220-227. DOI: 10.46873/2300-3960.1324.
21. Беляков Н.А., Емельянов И.А. Развитие подхода к обработке результатов измерений напряженного состояния методом кольцевой разгрузки // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2022. – Вып. 2. – С. 192-207. – DOI: 10.46689/2218-5194-2022-2-1-192-207.
22. Беликов А.А., Беляков Н.А. Методика прогноза напряженно-деформированного состояния междукамерных целиков, закрепленных податливой тросовой крепью // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – №4. – С. 20-34. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_20.
23. Беляков Н.А., Беликов А.А. Прогноз целостности водозащитной толщи на верхнекамском месторождении калийных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №6-2. – С. 33-46. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_33.
24. Komolov V., Belikov A., Kankhva V., Mezina N. Assessment of the impact of the construction of semi-buried structures on the surrounding buildings and the road system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 918, p. 012027. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012027.
25. Трушко В.Л., Баева Е.К. Обоснование рациональных параметров крепи комплекса горных выработок, проводимых в сложных горно-геологических условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – №12. – С. 55-69. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_55.
26. Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А. Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // Записки Горного института – 2022. – Т. 254. – С. 180-190.
27. Деменков П.А., Романова Е.Л., Котиков Д.А. Исследование формирования напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола и вмещающего массива горных пород в условиях неравномерности его контура // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11. – С. 33-48. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_33.
28. Деменков П.А., Романова Е.Л., Котиков Д.А. Анализ влияния рейтинговых методик оценивания массива на его физико-механические характеристики и на расчет крепи вертикального ствола // Известия УГГУ. – 2023. – Вып. 1(69). – С. 67-77. – DOI: 10.21440/2307-2091-2023-1-67-77.
29. Басалаева П.В., Куранов А.Д. Оценка влияния угла падения литологически неоднородной прослойки пород на устойчивость горизонтальной горной выработки при ее проходке // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 17-30. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_17.

30. Komolov V., Belikov A., Demenkov P.A. Investigation of the behavior of load-bearing structures when excavating a pit under the protection of a "Wall in the ground" // *Technological achievements in construction*. 2022, vol. 180, pp. 313-323. DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8.

References

1. Zhang W., Li H., Wu C., Ly Y. Soft computing approach for prediction of surface settlement induced by earth pressure balance shield tunneling // *Underground Space*. 2021, vol. 6, pp. 353-363. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.12.003.
2. Zhao S., Li S., Wan Z., Wang X. Effects of anti-clay agents on bubble size distribution and stability of aqueous foam under pressure for earth pressure balance shield tunneling // *Colloid And Interface Science Communications*. 2021, vol. 42, p. 100424. DOI: 10.1016/j.colcom.2021.100424.
3. Liu J., Tan Y., Song X., Fan D., Liu T. Effects of through-wall leaking during excavation in water-rich sand on lateral wall deflections and surrounding environment // *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*. 2023, vol. 57, no. 3, pp. 530-541. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2023.03.011.
4. Dang T., Meschke G. Influence of muck properties and chamber design on pressure distribution in EPB pressure chambers - Insights from computational flow simulations // *Tunnelling And Underground Space Technology*. 2020, vol. 99, p. 103333. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103333.
5. Fei P., Ma S. Analysis of experimental data on the effect of double-line parallel shield tunneling on the deformation of adjacent buildings // *Alexandria Engineering Journal*. 2021, vol. 60, pp. 3957-3963. DOI: 10.1016/j.aej.2021.02.034.
6. Dashko R.E., Korobko A.A. Engineering and geological substantiation of the safety of construction and operation of structures for various purposes within the Preglint lowland (Western part of the Leningrad region) // *Journal of Mining Institute*. 2013, vol. 206, pp. 95-100.
7. Zhou X., Zhai S. Estimation of the cutterhead torque for earth pressure balance TBM under mixed-face conditions // *Tunnelling And Underground Space Technology*. 2018, vol. 74, pp. 217-229. DOI: 10.1016/j.tust.2018.01.025.
8. Ochmanski M., Spacagna R., Modoni G. 3D numerical simulation of consolidation induced in soft ground by EPB technology and lining defects // *Computers And Geotechnics*. 2021, vol. 128, p. 103830. DOI: 10.1016/j.compege.2020.103830.
9. Martirosyants E. Indicators of stability of Proterozoic clay outcrops in tunnel faces // *Journal of Mining Institute*. 2009, vol. 180, pp. 87-91.
10. Novozhenin S.U., Vystrechil M.G. New Method of Surface Settlement Prediction for Saint-Petersburg Metro Escalator Tunnels Excavated by EPB TBM // *Procedia Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 2266-2271. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.283.
11. Mazein S.V., Potapov. M.A. Measuring the pressure of foam-ground compensation in the bottom of a tunneling shield for predicting man-made emergencies // *Mining information and analytical bulletin*. 2012, no. 9, pp. 245-250.
12. Liu X., Xu S., Huang Y. Optimal control for earth pressure balance of shield machine based on action-dependent heuristic dynamic programming // *ISA Transactions*. 2019, vol. 94, pp. 28-35. DOI: 10.1016/j.isatra.2019.04.007.
13. Liu X., Xu S., Shao C. Optimal control of earth pressure balance of shield tunneling machine based on dual-heuristic dynamic programming // *Optimal Control Applications and Methods*. 2020, vol. 41, pp. 1510-1523. DOI: 10.1002/oca.2612.
14. Polyakov A.V., Zhabin A.B., Chebotarev P.N., Khachaturian V.G. Design features of panel machines with ground cargo // *News of TulSU*. 2019, iss. 4, pp. 150-156.
15. George J. Tsekouras, John Kukulis, Maria-Katerina Nikolinku, Nikos E. Mastorakis. Prediction of Face Settlement During Tunneling Excavation Using Artificial Neural Network // *Proceedings of the WSEAS International Conference on engineering mechanics, structures, engineering geology (emeseg '08)*. – Cambridge: Cambridge University, 2008. – P. 33-39.
16. Jiankang L., Yujing C. and Osama S. Influence of geological conditions of rock mass ahead of tunnel face on the prediction performance of uniaxial compressive strength prediction model // *IOP Conference Series: Earth and Environment Science*. 2021, vol. 861, no. 4, p. 042116. DOI: 10.1088/1755-1315/861/4/042116.
17. Kang-Hyun L., Hyung-Joon S., Park J., Park J., In-Mo L. Probabilistic estimation of predicting the state of the soil in front of TBM tunnels, combining each method of geophysical forecasting. // *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*. 2016, vol. 18, iss. 3, pp. 257-272. DOI: 10.9711/KTAJ.2016.18.3.257.
18. Alekseev A.V., Verbilo P.E., Protosenya A.G. Prognosis of the stress-strain state and stability of the tunnel face forehead at the intersection of disturbed zones of the soil massif // *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 252-260. DOI: 10.31897/PMI.2022.26.
19. Karasev M.A. Analysis of the causes of deformation of the Earth's surface and the nature of the formation of subsidence caused by the construction of transport tunnels // *Journal of Mining Institute*. 2011, vol. 190, pp. 163-171.
20. Ignatiev S., Sudarikov A.E., Imashev A.J. Determination of the stress-strain state of a rock mass and a zone of inelastic deformations around an underground mine using modern numerical modeling methods // *Journal of Sustainable Mining*. 2021, vol. 20, iss. 3, pp. 220-227. DOI: 10.46873/2300-3960.1324.

21. Belyakov N.A., Emelyanov I.A. Development of an approach to processing the results of measurements of the stressed state by the ring unloading method // News of TulSU. Earth sciences. 2022, iss. 2, pp. 192-207. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-2-1-192-207.
22. Belikov A.A., Belyakov N.A. Methodology for predicting the stress-strain state of inter-chamber pillars secured with a pliable cable support // Mining information and analytical bulletin. 2023, no. 4, pp. 20-34. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_20.
23. Belyakov N.A., Belikov A.A. Forecast of the integrity of the water-protective layer at the Verkhnekamsk potash ore deposit // Mining information and analytical bulletin. 2022, no. 6-2, pp. 33-46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_33.
24. Komolov V., Belikov A., Kankhva V., Mezina N. Assessment of the impact of the construction of semi-buried structures on the surrounding buildings and the road system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 918, p. 012027. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012027.
25. Trushko V.L., Baeva E.K. Substantiation of rational parameters of mine support system for underground roadways in difficult geological conditions // Mining information and analytical bulletin. 2023, no. 12, pp. 55-69. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_55.
26. Dashko R.E., Lokhmatikov G.A. Verkhnekotlinsky clays of the St. Petersburg region as the foundation and environment of unique structures: engineering-geological and geotechnical analysis // Journal of Mining Institute. 2022, vol. 254, pp. 180-190.
27. Demenkov P.A., Romanova E.L., Kotikov D.A. Stress-strain analysis of vertical shaft lining and adjacent rock mass under conditions of irregular contour // Mining information and analytical bulletin. 2023, vol. 11, pp. 33-48. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_33.
28. Demenkov P.A., Romanova E.L., Kotikov D.A. Analysis of the impact of rating methods for assessing the rock mass on its physical and mechanical characteristics and on the calculation of the support of a vertical shaft // News of the Ural State Mining University. 2023, iss. 1(69), pp. 67-77. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-1-67-77.
29. Basalaeva P.V., Kuranov A. D. Influence of dip angle of lithologically nonuniform interburden on horizontal mine opening stability during driving // Mining information and analytical bulletin. 2024, no. 3, pp. 17-30. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_17.
30. Komolov V., Belikov A., Demenkov P.A. Investigation of the behavior of load-bearing structures when excavating a pit under the protection of a "Wall in the ground" // Technological achievements in construction. 2022, vol. 180, pp. 313-323. DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Протосеня Анатолий Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СГПиПС	Protosenya Anatoly Grigorievich – doctor of technical sciences, professor, head of the Department of CME&US
Кумов Всеволод Васильевич – аспирант vshuk1@mail.ru	Kumov Vsevolod Vasilievich – postgraduate student

Получена 10.06.2024