

На правах рукописи



Знаменская Екатерина Антоновна

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА ПРИ ЩИТОВОЙ  
ПРОХОДКЕ ТОННЕЛЯ МЕТРОПОЛИТЕНА И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА  
РАБОТУ ОДИНОЧНОЙ СВАИ**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ).

Научный  
руководитель:

Доктор технических наук, профессор  
**Зерцалов Михаил Григорьевич**

Официальные  
оппоненты:

**Готман Наталья Залмановна**

Доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта", кафедра «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты», профессор.

**Разводовский Дмитрий Евгеньевич**

Кандидат технических наук, акционерное общество «Научно-исследовательский центр «Строительство», Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений имени Н. М. Герсеванова, заместитель директора по научной работе.

Ведущая  
организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства».

Защита состоится «11» июня 2024г. в 14:30 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.05 (Д 212.138.14), созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 9 студия «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте <http://www.mgsu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета



Сидоров Виталий Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Характерной чертой развития транспортной инфраструктуры многих крупных городов является постоянное расширение строительства новых станций и линий метрополитена. Так, за последнее десятилетие в Москве было проложено 69 км перегонных тоннелей и возведено 87 новых станций метро, а линии метрополитена пересекли границы мегаполиса, предоставив удобную и надежную транспортную связь со столицей жителям многих населенных пунктов пригорода Москвы и Московской области.

При строительстве новых линий метрополитена, которое в настоящее время ведется, как правило, щитовым методом с использованием тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК), специалистам приходится решать не только вопросы эксплуатационной надежности и безопасности возведенных сооружений, но и вопросы обеспечения сохранности существующей городской застройки. Механизированная щитовая проходка, как и любое строительство подземных объектов, приводит к деформациям прилегающих к тоннелю областей вмещающего массива грунта и осадкам земной поверхности, что оказывает существенное влияние на работу фундаментов зданий и сооружений окружающей городской застройки. Наиболее сложное воздействие смещающиеся при проходке тоннеля массы грунта оказывают на свайные фундаменты, не только догружая их силами отрицательного трения, но и передавая на них боковое давление смещающихся масс, что приводит к изгибу свай и способно вызвать их излом. Указанные процессы в настоящее время изучены недостаточно и в отечественных нормативных документах не отражены, а в этом, учитывая интенсивность развития строительства линий метрополитена в Москве и в других городах России, создалась насущная необходимость. Успешное решение этих вопросов будет способствовать повышению экономических показателей принимаемых проектных решений и эксплуатационной надежности возведенных сооружений при обеспечении сохранности наземных городских объектов.

На основании изложенного тема диссертационной работы, посвященная изучению влияния щитовой проходки тоннелей метрополитена на деформации грунтового массива и НДС расположенных в ней свай, представляется актуальной.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросу изучения различных аспектов формирования напряжено-деформированного состояния грунтовых масс при щитовой прокладке тоннелей и ее влияния на фундаменты зданий и сооружений существующей застройки посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых и специалистов (Беляков Н.А., Готман Н.З., Далматов Б.И., Зерцалов М.Г., Исаев О.Н., Карасёв М.А., Конюхов Д.С., Меркин В.Е., Петрова Е.Н., Петрухин В.П., Протосеня А.Г., Пушилилин А.Н., Разводовский Д.Е., Строкова Л.А., Тер-Мартirosян А.З., Тер-Мартirosян З.Г., Шарафутдинов Р.Ф., Шейнин В.И., Addenbrooke T.I., Burd H.J., Cheng C.Y., Chow Y.K., Dasari G.R., Jacobsz S.W., Leung C.F., Loganathan N., New

В.М., O'Reilly M.P., Ran Xia, Peck R.B., Potts D.M., Puzrin A.M. и др.). В большинстве из них рассмотрены процессы формирования мульды оседания на подрабатываемых территориях и осадки фундаментов мелкого заложения, расположенных над выработками зданий и сооружений.

В современной практике проектирования размер мульды оседания, ограничивающей воронку осадок дневной поверхности, определяется с использованием эмпирических зависимостей, полученных на основе натуральных наблюдений или аналитических или численных решений для условий плоской задачи. Указанные методы позволяют строить мульды осадок только в сечениях, совпадающих с плоскостью забоя тоннеля (плоскостью щита), при этом результаты, вычисляемые по эмпирическим зависимостям, учитывая, что они получены в различных инженерно-геологических условиях, имеют большой разброс. Существующие аналитические решения также получены для условий плоской задачи с принятием, как правило, ряда упрощающих допущений, что существенно влияет на точность прогноза. Так поверочные расчёты, выполненные с использованием численного моделирования, показали, что результаты, полученные для условий плоской и объёмной задач, могут отличаться в 1,5–2,0 раза. Очевидно, что этот вопрос требует проведения дополнительных исследований.

Следует также отметить, что мульда осадок позволяет с той или иной степенью точности оценить влияние щитовой проходки на крены и перемещения фундаментов мелкого заложения, но ее недостаточно для оценки последствий проходки на работу свай, подверженных воздействию смещающегося при движении проходческого щита грунта. На рисунке 1 показано, что смещение части грунтового массива в направлении тоннеля приводит к деформациям свай и появлению в них дополнительных внутренних усилий. Указанный процесс, как отмечено выше, в настоящее время изучен недостаточно. Кроме того, как это следует из обзора литературы, в подавляющем большинстве исследований рассматривались сваи со свободной головой, а влияние сопряжения сваи с ростверком (свободная голова, шарнирное соединение, заделка сваи в жесткий недеформируемый ростверк) на НДС сваи, полностью или частично помещенной в призму оседания грунта над тоннелем, практически не изучалось.

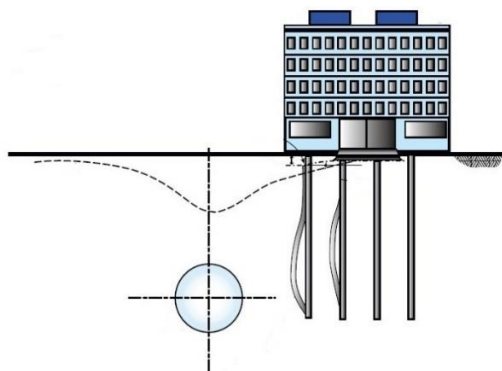


Рисунок 1 – Влияние щитовой проходки тоннеля на работу свай

Изложенное определяет необходимость проведения дальнейших, более углубленных исследований влияния механизированной щитовой проходки тоннеля на фундаменты окружающей застройки, особенно на свайные фундаменты, что является важной и актуальной задачей.

На основании изложенного сформулирована цель диссертационной работы и определены задачи, решение которых необходимо для ее достижения.

**Цель диссертационной работы** - исследования влияния щитовой проходки тоннеля на деформации грунтового массива и работу свай фундаментов существующей застройки.

**Задачи исследования:**

- построение трехмерной численной модели для изучения влияния щитовой проходки тоннеля на деформации грунтового массива в основании фундаментов существующей городской застройки;

- разработка методики построения мульды осадок земной поверхности и определения деформаций грунтового массива при движении механизированного щита;

- численное моделирование взаимодействия одиночной сваи с оседающим при щитовой проходке тоннеля грунтом;

- математико-статистический анализ результатов численного моделирования, получение уравнений регрессии для определения максимальных осевых усилий, максимальных изгибающих моментов и осадок одиночных свай, полностью или частично расположенных в призме оседания грунта;

- исследование влияния сопряжения головы сваи с ростверком (шарнирное соединение, жесткая заделка) на напряженно-деформированное состояние сваи, и разработка методики его учета при определении внутренних усилий и перемещений сваи, обусловленных оседанием грунта при щитовой проходке тоннеля.

**Объект исследований** – Одиночная свая во взаимодействии с оседающим при щитовой проходке подземного тоннеля грунтовым массивом.

**Предмет исследований** – осадки земной поверхности и поле смещений точек грунтового массива в призме его оседания при щитовой проходке тоннеля, а также внутренние усилия и осадка помещенной в него одиночной сваи со свободной или зафиксированной головой.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- получены новые данные о механизме формирования мульды оседания земной поверхности грунта и деформациях грунтового массива в пределах призмы его оседания, вызванного щитовой проходкой тоннеля;

- установлены закономерности влияния смещений грунта в призме его оседания при щитовой проходке тоннеля на НДС одиночной сваи в зависимости от расположения ее нижнего конца относительно горизонтальной оси тоннеля (выше, на одном уровне, ниже) и расстояния по горизонтали от сваи до вертикальной оси тоннеля;

- получены новые данные о влиянии условий сопряжения головы сваи с ростверком (свободная голова, шарнирное соединение с ростверком, жесткая заделка в ростверк) на НДС сваи, полностью или частично расположенной в призме оседания грунта, вызванного щитовой проходкой тоннеля.

**Теоретическая значимость работы состоит:**

- в разработке методики расчёта и построения мульды осадок земной поверхности в поперечном к оси тоннеля направлении и определения перемещений точек грунтового массива в призме оседания грунта, вызванного проходкой тоннеля щитовым комплексом;

- в получении уравнений регрессии для определения максимальных осевых усилий и максимальных изгибающих моментов в сечениях одиночных свай, полностью или частично расположенных в призме оседания грунта над тоннелем;

- в разработке методики учета сопряжения головы сваи с ростверком при определении максимального изгибающего момента, вызванного оседанием грунта при щитовой проходке тоннеля;

- в получении уравнения для определения осадки сваи, вызванной отрицательным трением при оседании грунта, создаваемой отрицательными силами трения на боковых поверхностях свай, вызванных оседанием окружающего грунта.

**Практическая значимость работы заключается:**

- в установлении расстояния до щита, при котором осадки земной поверхности возрастают в точке схода его оболочки со смонтированного кольца обделки и принимают максимальное значение;

- в возможности использования результатов выполненных исследований и разработанных на их основе методик при определении размеров зоны влияния щитовой проходки тоннеля на фундаменты окружающей городской застройки, что позволяет назначить тип и оптимизировать объем защитных мероприятий, необходимых для ее сохранения в нормальном эксплуатационном состоянии;

- в возможности определения внутренних усилий в сваях, частично или полностью расположенных в призме оседающего грунта, с целью проверки их работоспособности при щитовой проходке тоннеля;

- в возможности использования результатов проведенных исследований и разработанных методик расчета для актуализации нормативных документов в области геотехнического строительства.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой проведенных исследований являлись труды отечественных и зарубежных ученых, проектировщиков и строителей в области геотехники. В диссертационной работе применялись следующие методы:

- анализ литературных источников по теме диссертационной работы;

- численное моделирование щитовой проходки тоннеля на напряженно деформированное состояние грунтового массива и ее влияния на работу свай с применением современных сертифицированных программных комплексов;

- использование современных программных комплексов Z Soil, Abacus и методов математико-статистического анализа SPSS и MATLAB для вычисления и обработки результатов проведенных исследований.

**Достоверность результатов** проведенных в диссертационной работе исследований обеспечивается применением основных гипотез и моделей поведения материалов, применяемых в механике грунтов, использованием классических решений теории упругости и теории пластичности, современных программных комплексов и методик обработки экспериментальных данных.

**Положения, выносимые на защиту:**

- методика и результаты численного моделирования влияния щитовой проходки тоннеля метрополитена на напряженно-деформированное состояние грунтового массива и взаимодействия оседающей грунтовой толщи с одиночной фундаментной свайей;

- методика построения мульты оседания земной поверхности и определения перемещений точек грунтового массива в призме оседания грунта в окрестностях тоннеля при его щитовой проходке, разработанная на основе численного моделирования в трёхмерной постановке и обработки полученных результатов с использованием регрессионного факторного анализа;

- методика и результаты численного исследования влияния щитовой проходке тоннеля на напряженно-деформированное состояние одиночной сваи, полностью или частично расположенной в призме оседания грунта над тоннелем;

- методики определения максимальных осевых усилий и максимальных изгибающих моментов, индуцированных в свае со свободной или фиксированной головой оседающим при щитовой проходке тоннеля грунтом;

- методика определения осадки одиночной сваи со свободной головой, вызванной отрицательным трением на ее боковой поверхности на участках оседания окружающего грунта.

**Личный вклад автора диссертации** заключается:

- в выполнении анализа литературных источников по различным аспектам рассматриваемой в диссертационной работе тематики, что позволило обосновать ее актуальность и определить цель и задачи проведения исследований;

- в разработке методики и выполнении численного моделирования закономерностей влияния щитовой проходки тоннеля метрополитена на напряженно-деформированное состояние грунтового массива и расположенной в нём одиночной сваи;

- в выполнении математико-статистического анализа результатов проведенных исследований;

- в разработке методики построения мульты оседания дневной поверхности в поперечном к оси тоннеля направлении и определения

смещений точек грунтового массива в, формирующейся в окрестностях тоннеля, призме его оседания;

- в разработке модели мультилинейной регрессии и получения на ее основе факторных зависимостей, позволяющих рассчитать максимальные осевые усилия, максимальные изгибающие моменты и осадки свай в зависимости от рассмотренных в проведенных исследованиях факторов;

- в подготовке материалов для публикации результатов выполненных исследований в научных изданиях.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 научных статей, 5 из которых опубликована в журнале, индексируемом в базе данных ВАК.

В диссертации использованы результаты научных работ, выполненных автором – соискателем ученой степени кандидата технических наук – лично и в соавторстве.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 122 страницы, 71 рисунок и 26 таблиц.

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Механика грунтов и геотехника» НИУ МГСУ. Автор выражает глубокую признательность за научное руководство д.т.н., профессора Зерцалова Михаила Григорьевича, а также благодарит за доброжелательное отношение и предоставленную методическую помощь сотрудников кафедры «Механика грунтов и геотехника» НИУ МГСУ.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** представлен краткий обзор опубликованных результатов исследований влияния проходки подземных тоннелей на деформации вмещающего грунтового массива и фундаменты существующей застройки, проведенных отечественными (Бабушкин Н.Ф., Беляков Н.А., Зерцалов М.Г., Исаев И.О., Исаев О.Н., Карасёв М.А., Петрухин В.П., Протосеня А.Г., Тер-Мартirosян А.З., Тер-Мартirosян З.Г., Струнин П.В., Фаворов А.В., Шарафутдинов Р.Ф., Шейнин В.И., Шишкина В.В.) и зарубежными (До Нгок Тхай, Bolton M.D., Booker J.R., Bracegirdle A., Dasari G.R., Dyer M.R., Evans N., Hutchinson M.T., Lee C.J., Lee K.M., Lo K.Y., Loganathan N., Mair R.J., Peck R.B., Poulos H.G., Rawlings C.G., Rowe R.K., Sagaseta C., Taylor R.N., Verruijt A.) учеными и специалистами.

В работах названных авторов рассмотрены механизм формирования и методики определения объема «потерянного грунта» при движении щита, методики построения мульды осадок дневной поверхности, выполнено сравнение методик ее расчета, которое показало большой разброс полученных результатов (до 40%). Отмечено, что построение мульд осадок позволяет с достаточной для практических целей точностью прогнозировать вызванные проходкой осадки фундаментов зданий и сооружений мелкого заложения. Что касается свайных фундаментов, то на их работу оказывают влияние не столько



осадки земной поверхности, сколько подвижки грунта в границах призмы его оседания, формирующейся при движении проходческого щита.

Влияние щитовой проходки тоннелей на работу свай изучалось в нашей стране и за рубежом различными методами, включавшими: натурные испытания, лабораторные исследования (физическое моделирование) и численное моделирование на базе метода конечных элементов.

Большой интерес представляют полномасштабные натурные эксперименты, однако их число крайне ограничено из-за сложности организации проведения и трудоёмкости и стоимости выполнения. В различные годы ими занимались Coutts D. R., Lee R.G. et al., Loganathan N. et al., Mroueh H. et al., Ran Xia, Teunissen E. A. et al., Wang J. и др.. Результаты проведенных полевых измерений позволили строителям и проектировщикам решить поставленные перед ними частные задачи. В то же время, полученная информация не была достаточной для установления обобщающих закономерностей взаимодействия свай с оседающим грунтом при щитовой проходке тоннелей, хотя и показала её существенное влияние на работу свай.

Наибольшее распространение при изучении влияния проходки тоннелей на работу свай получили лабораторные исследования, большинство которых проведено на центрифугах. Лабораторные исследования Bezuijen et al., Hegarden H. J. et al., Jacobsz S. W. et al, Loganathan N. et al, Morton H. et al. и др. позволили, в отличие от полевых, в гораздо большем объеме и более подробно исследовать основные факторы влияния щитовой проходки тоннелей на работу свай, полностью или частично расположенных в призме оседающего грунта. Результаты физического моделирования подтвердили и дополнили результаты полевых экспериментов, но все же не дали возможность в полной мере изучить влияние на работу свай всех возникающих при щитовой проходке тоннеля факторов.

Позже, с появлением метода конечных элементов и развитием численных комплексов, для изучения влияния щитовой проходки на работу свай начали использовать численное моделирование (Chen L. T. et al., Chow Y. K., Mroueh H., Ran Xia, Shahrour I., Yong K. Y. и др.). Численное моделирование существенно расширило рамки исследований по изучению процессов деформирования и подвижек грунтов при щитовой проходке тоннелей и их влияния на работу свай существующих фундаментов.

Выполненный анализ рассмотренных материалов показал необходимость дальнейшего изучения механизма формирования и методики определения объемов «потерянного грунта» при движении щита и разработку способов их численного моделирования в трехмерной постановке, методики построения мульды осадок, где ключевым моментом является определение максимальной осадки в центре мульды  $S_{z \max}$ . Знание  $S_{z \max}$  даёт возможность определять перемещения не только точек земной поверхности и оценить осадку фундаментов мелкого заложения, но и точек грунтового массива в пределах глубины заложения тоннеля, что необходимо для оценки влияния

проходческих работ на работу свай фундаментов существующей застройки, чему и посвящены главы 2 и 3 диссертации.

**Вторая глава** посвящена изучению процесса деформирования грунтового массива при движении щита, дальнейшему развитию методов построения мульды осадок земной поверхности и вычисления смещений точек грунтового массива в оседающем массиве.

Исследования деформаций грунтового массива при щитовой проходке тоннеля выполнялись на основе совместного использования метода конечных элементов (МКЭ) и метода планирования эксперимента, основанного на регрессионном анализе полученных результатов численных расчётов.

Моделирование щитовой проходки и её влияния на деформации вмещающего тоннель грунтового массива выполнялось с помощью программного комплекса Z-Soil -2019.

Грунт моделировался упруго-пластической моделью Мора-Кулона. Расчётный фрагмент рассматриваемой задачи с конечно-элементной сеткой представлен на рисунке 2. Размеры фрагмента принимались в соответствии с указаниями СП 249.1325800.2016 и составили: 120x100 м. Высота фрагмента в каждом расчётном случае определялась глубиной заложения тоннеля. В расчётной конечно-элементной сетке учитывались жёсткость оболочки щита и тоннельной обделки.

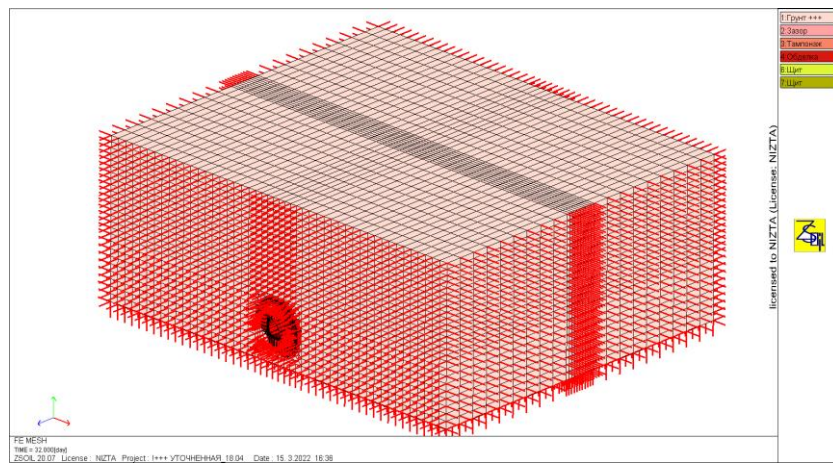


Рисунок 2 - Расчётный фрагмент конечно – элементной сетки

В качестве независимых значимых переменных (факторов), в наибольшей степени влияющих на осадки земной поверхности, с учётом анализа литературных источников и опыта проектирования тоннелей метрополитена, были выбраны:  $H_T$  – глубина заложения тоннеля,  $D_T$  – диаметр тоннеля,  $E_{гр}$  – модуль деформации грунта. Факторы варьировались в следующих пределах: глубина заложения  $H_T$  (15 – 30м), диаметр тоннеля –  $D_T$  (6 – 10м), модуль деформации -  $E_{гр}$  (6 – 30 МПа). Расчёты выполнялись для двух видов грунтов: песка и глины. Прочностные характеристики грунтов  $\varphi$  и  $c$  определялись в каждом расчёте, как функция от  $E_{гр}$  по эмпирическим зависимостям:

В качестве функции отклика принималась максимальная осадка земной поверхности над тоннелем-  $S_{z \max}$ .

Численное исследование деформирования массива при движении щита показало, что после схода корпуса (оболочки) щита со смонтированного кольца обделки тоннеля вследствие того, что жёсткость кольца намного меньше жёсткости оболочки, осадка грунта над тоннелем стабилизируется и принимает максимальное значение  $S_{z \max}$  только на некотором расстоянии за щитом.

Результаты одного из расчетов в виде изополей вертикальных деформаций поверхности грунта в продольном и поперечном сечениях показаны на рисунках 3 и 4. На продольном разрезе точка Б обозначает сечение, где осадка принимает максимальное значение. Согласно расчету, эта точка зафиксирована на расстоянии порядка  $(3 - 3,5) D_T$  за щитом.

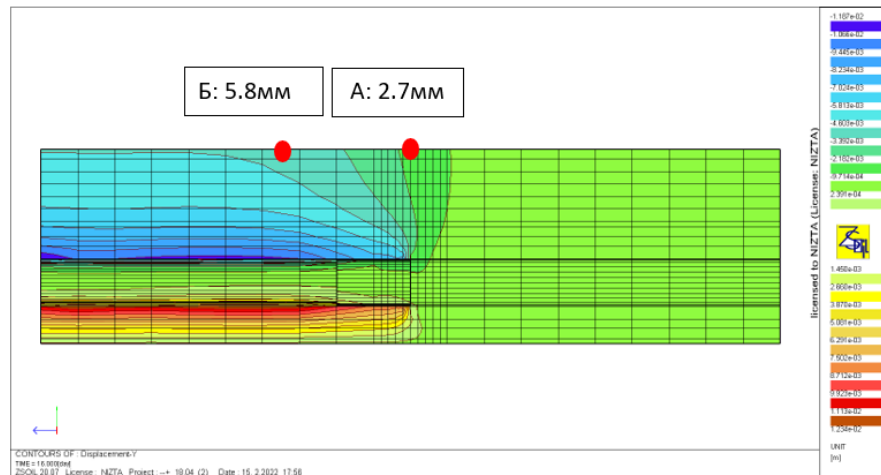


Рисунок 3 - Изополя вертикальных перемещений грунтового массива (продольное сечение).

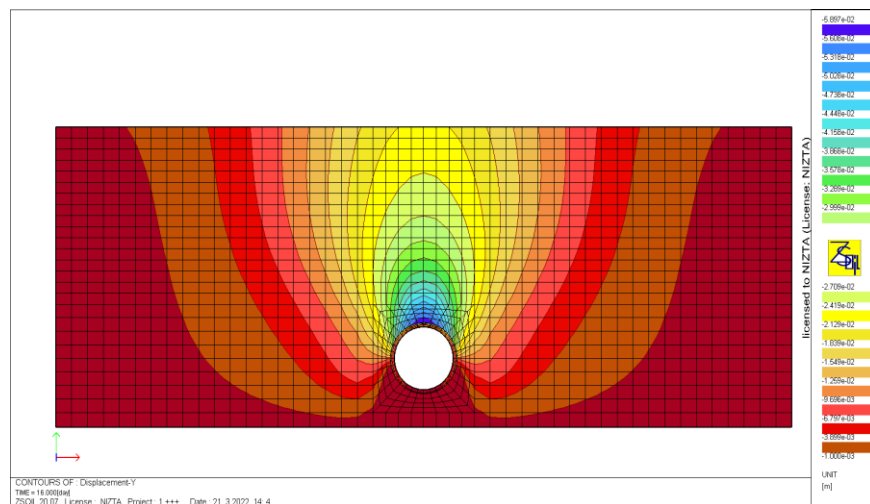


Рисунок 4 - Изополя вертикальных перемещений грунтового массива (поперечное сечение)

Уравнение регрессии для определения  $S_{z \max}$  для глинистых грунтов, Аполученное с помощью математико-статистического анализа результатов численного моделирования имеет следующий вид:

$$S_{z \max} = 96.925 + 25.275 \times \left[ \frac{D_T - 8}{2} \right] + 69.3 \times \left[ \frac{H_T - 22,5}{7,5} \right] - 74,625 \times \left[ \frac{E_{гр} - 18}{12} \right] + \quad (1)$$

$$28.55 \times \left[ \frac{D_T - 8}{2} \right] \times \left[ \frac{H_T - 22,5}{7,5} \right] - 15.375 \times \left[ \frac{D_T - 8}{2} \right] \times \left[ \frac{E_{гр} - 18}{12} \right] - 61.3 \times \left[ \frac{H_T - 22,5}{7,5} \right] \times$$

$$\left[ \frac{E_{гр} - 18}{12} \right] - 24.25 \times \left[ \frac{D_T - 8}{2} \right] \times \left[ \frac{H_T - 22,5}{7,5} \right] \times \left[ \frac{E_{гр} - 18}{12} \right]$$

Аналогичное уравнение регрессии получено и для песчаных грунтов.

Адекватность уравнений подтверждается и значением коэффициентов детерминации ( $r^2 = 0.81 \geq 0,8$ ), что позволяет рекомендовать их для практических расчетов при проектировании тоннелей в городских условиях.

**Третья глава** посвящена исследованию влияния щитовой проходки тоннеля на работу свай фундаментов существующей застройки, зависимости этого влияния от различных факторов и установления закономерностей, необходимых для разработки новых и совершенствования существующих методик его учета при проектировании проходческих работ.

Исследование проводилось численным методом с использованием ПК ABAQUS 2017. Грунт моделировался упругопластической моделью, основанной на критерии разрушения Мора-Кулона, железобетонные свая и тоннель - упругой моделью. Контактный элемент устанавливался между сваей и грунтом для имитации сил трения на ее боковой поверхности в соответствии с моделью Мора-Кулона.

Модели поведения и характеристики материалов свай, тоннеля и грунта при проведении численных исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Модели поведения и расчетные характеристики материалов

Свойства	Настоящее исследование	
	Тоннель и свая	Грунт
Модели поведения материалов	Линейно-упругая	Упруго-пластическая
Удельный вес $\gamma$ , (кН/м <sup>3</sup> )	-	16,5
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,15	0,30
Модуль деформации $E_{гр}$ , (кПа)	-	7500
Модуль упругости бетона $E_b$ , (кПа)	2174750 0	-
Удельное сцепление $c$ , (кПа)	-	15
Угол внутреннего трения $\phi$ , (град)	-	32
Угол дилатансии $\psi$ , (град)	-	0,1
Коэф. бокового давления грунта $K_0$	-	0,5

Влияние щитовой проходки тоннеля на работу сваи определялось в зависимости от расположения ее нижнего конца относительно горизонтальной оси тоннеля (выше оси тоннеля, на глубине, равной глубине расположения оси тоннеля, и на глубине, превышающей глубину заложения тоннеля), расстояния от вертикальной оси тоннеля до сваи по горизонтали и условий закрепления ее верхнего конца (свободная голова сваи, голова сваи заделана в жесткий недеформируемый ростверк или соединена с ростверком шарнирно). Изучение и анализ литературных источников показал, что эти факторы являются ключевыми, определяющими степень влияния проходки тоннеля на работу свай.

В проведенных исследованиях диаметр тоннеля составлял  $D_T = 6,0$  м; длина тоннеля  $L_T = 40,0$  м; диаметр сваи  $d_{св} = 1,0$  м; глубина проходки тоннеля  $Z_T = 25,0$  м; расстояние от оси тоннеля до оси сваи принимало значения  $S = 6, 9, 12$  м; длина сваи  $L_{св} = 15, 25, 35$  м.

Расчетная схема и геометрические размеры конечно-элементной модели представлены на рисунке 5.

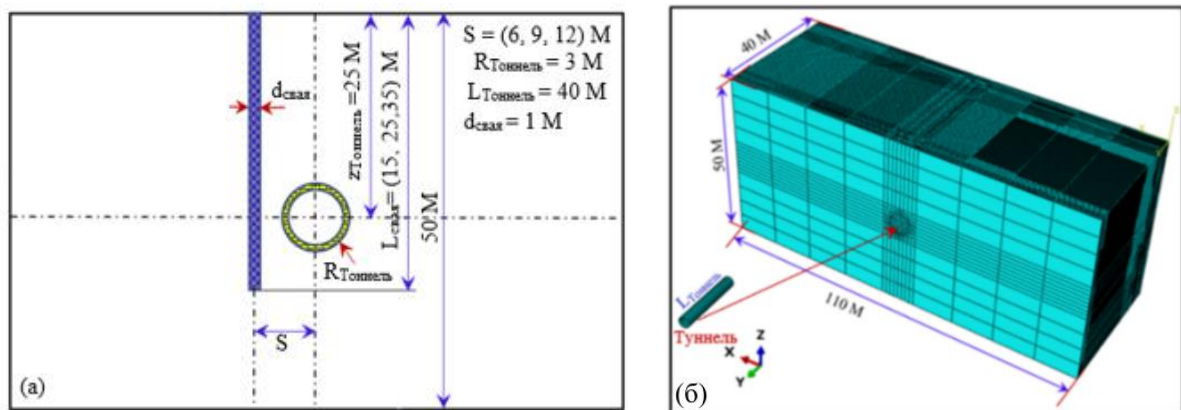


Рисунок 5 - (а) Расчетная схема; (б) 3D конечно-элементная модель

## Результаты численного моделирования

### *Сваи со свободной головой при их одинаковом удалении от оси тоннеля*

На рисунке 6 показаны эпюры распределения касательных напряжений по боковым поверхностям трех свай, расположенных на одинаковом расстоянии от тоннеля, но имеющих различную длину, в результате чего их нижние концы расположены выше тоннеля (короткие сваи -  $L_{св}/Z_T > 1$ ), на уровне оси тоннеля (сваи средней длины -  $L_{св}/Z_T = 1$ ) и ниже оси тоннеля (длинные сваи -  $L_{св}/Z_T < 1$ ).

Из рисунка видно, что у короткой сваи, полностью расположенной в призме оседающего грунта, отрицательные касательные напряжения развиваются по всей ее длине, постепенно увеличиваясь с глубиной, и достигают максимального значения у нижнего конца сваи. Когда длина сваи

равна глубине расположения оси туннеля (свая средней длины) или превышает ее (длинная свая), в верхней части сваи возникает отрицательное трение до глубины пересечения ее оси с призмой оседания грунта над туннелем, а ниже - положительное.

На рисунке 7 для тех же свай показано распределение осевых усилий по их длине. Из рисунка видно, что у короткой сваи максимальное осевое усилие приходится на ее нижний конец, а у сваи средней длины и длинной максимальные осевые усилия возникают на уровне плоскости, разделяющей отрицательные и положительные касательные напряжения по боковым поверхностям свай. Эту плоскость принято называть нейтральной или нулевой плоскостью, а глубину, на которой она расположена – нейтральной глубиной. Знание глубины расположения нейтральной плоскости необходимо для определения дополнительных усилий на сваю, вызванных оседанием грунта при проходке туннеля.

Эпюры горизонтальных смещений (прогибов) рассматриваемых свай показаны на рисунке 8. Из рисунка видно, что короткая свая, полностью расположенная в призме оседания грунта, смещается по всей длине в одном положительном по оси абсцисс направлении, а максимальное горизонтальное смещение получает ее нижний конец. Изгибающие моменты у короткой сваи невелики и практически не меняют свой знак. Горизонтальные смещения длинных свай и свай средней длины, пересекающих в нижней части границу призмы оседания грунта, происходят в двух противоположных направлениях, что вызывает развитие в их сечениях существенных изгибающих моментов. Максимальный изгибающий момент у длинных свай развивается на уровне оси туннеля, а у свай средней длины на 3, 4 м выше ее уровня (рисунок 9).

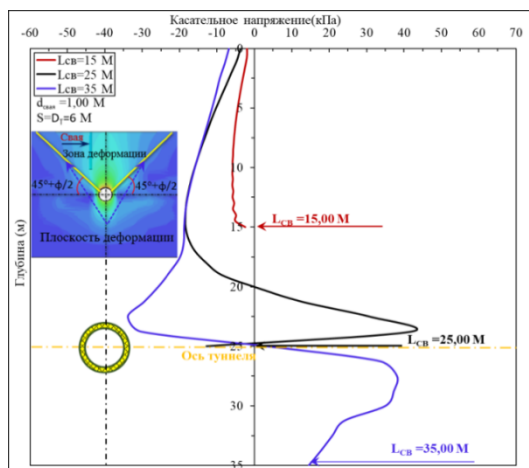


Рисунок 6 - Распределение касательных напряжений по боковым поверхностям свай

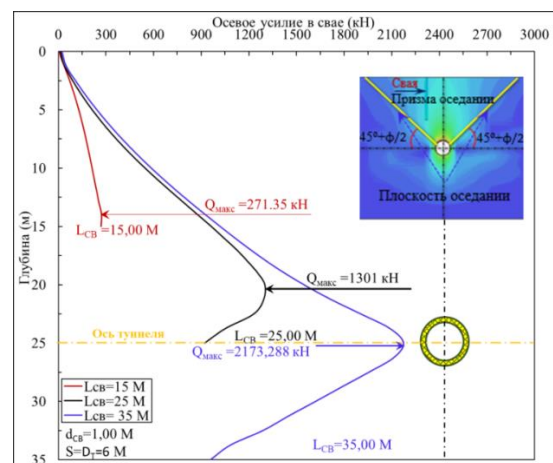


Рисунок 7 - Распределение осевых усилий в стволе сваи

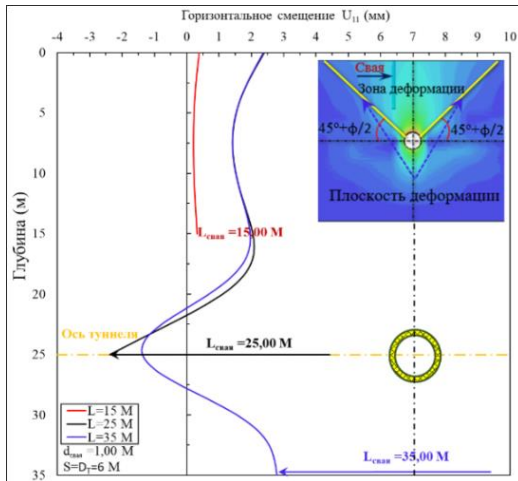


Рисунок 8 - Горизонтальные смещения свай

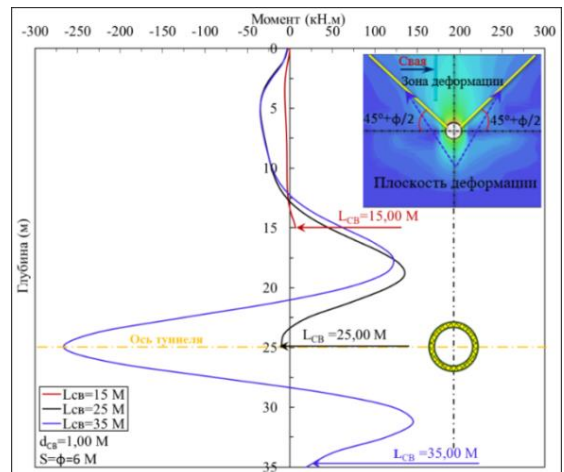


Рисунок 9 – Распределение изгибающих моментов по длине свай

### *Сваи со свободной головой при их различном удалении от оси тоннеля*

Для свай тех же длин, но при их различном расстоянии от вертикальной оси тоннеля, численные расчеты показали, что по мере удаления свай от оси тоннеля влияние его проходки на развитие касательные напряжения на боковых поверхностях свай, дополнительных осевых усилий в сваях, горизонтальных смещения свай и вызванных ими изгибающих моментов снижается. Наибольшая интенсивность снижения этого влияния зафиксирована при увеличении расстояния от свай до тоннеля от 6 до 9 м (от  $1$  до  $1,5D_T$ ). Расстояние, на котором влияние проходки тоннеля на НДС свай сходит на нет, составляет порядка  $3-5 D_T$ .

Для примера на рисунках 10-13 показаны эпюры распределения касательных напряжений, осевых усилий, горизонтальных смещений (прогибов) и изгибающих моментов для свай средней длины ( $L_{св}=25$  м) и длинных ( $L_{св}=35$  м) свай при их различном расстоянии (6, 9, и 12 м) от тоннеля. Аналогичные эпюры получены и для коротких и длинных свай ( $L_{св}=15$  м и 25 м).

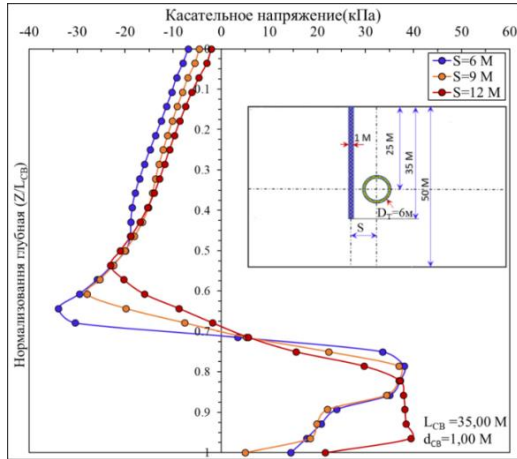


Рисунок 10- Распределение касательных напряжений по боковым поверхностям свай длиной 35 м

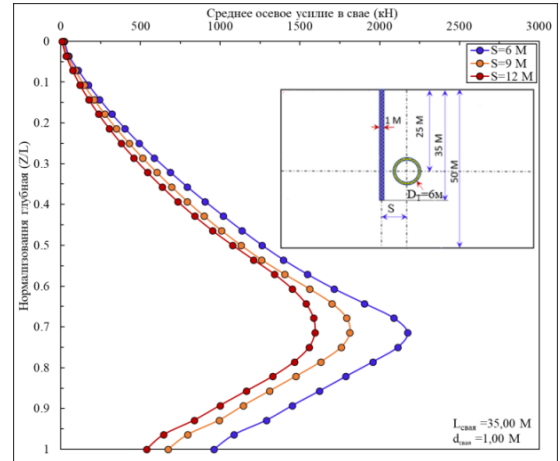


Рисунок 11 - Распределение осевых усилий в сваях длиной 35 м

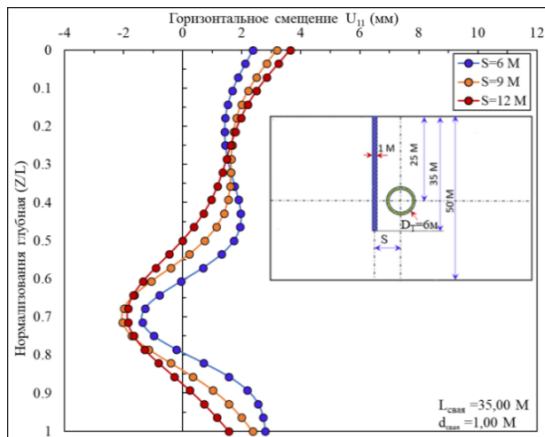


Рисунок 12 - Горизонтальные смещения свай длиной 35 м

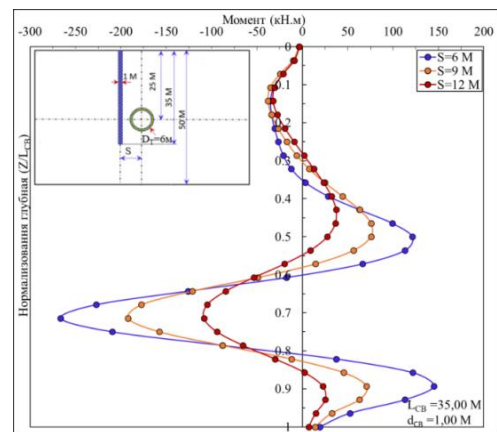


Рисунок 13 - Распределение изгибающих моментов в сваях длиной 35 м

### *Сваи с шарнирным и жестким сопряжением с недеформируемым ростверком*

При изучении влияния типа сопряжения свай с ростверком (шарнирное или жесткое) на ее напряженно-деформированное состояние при проходке тоннеля на смещения головы свай были наложены следующие ограничения:

- при шарнирном сопряжении  $U_x=U_y=U_z=0$ , где  $U_x=U_y=U_z$  – смещения по трем осям X, Y, и Z;

- при жестком сопряжении к этим трем ограничениям добавляется четвертое, запрещающее поворот головы свай в уровне ее заделки в ростверк –  $\Psi=0$ .



Полученные по результатам выполненных расчетов с учетом указанных ограничений эпюры распределения касательных напряжений по боковым поверхностям свай, распределения осевых усилий по их длине, горизонтальных смещений свай и изгибающих моментов, приведенные на рисунках 14-17, показали следующее.

Сопряжение головы сваи с ростверком приводит к снижению касательных напряжений на ее боковой поверхности по сравнению со свайей со свободной головой (рисунок 14) и, как следствие, к снижению осевых усилий в ее стволе (рисунок 15). Это объясняется уменьшением горизонтального реактивного отпора грунта на боковую поверхность сваи при ограничении ее горизонтального смещения ростверком.

Тип сопряжения мало влияет на величину горизонтального смещения сваи (рисунок 16), но оказывает заметное влияние на изгибающие моменты в ее стволе. При жесткой заделке головы сваи в ростверк они существенно больше (рисунок 17).

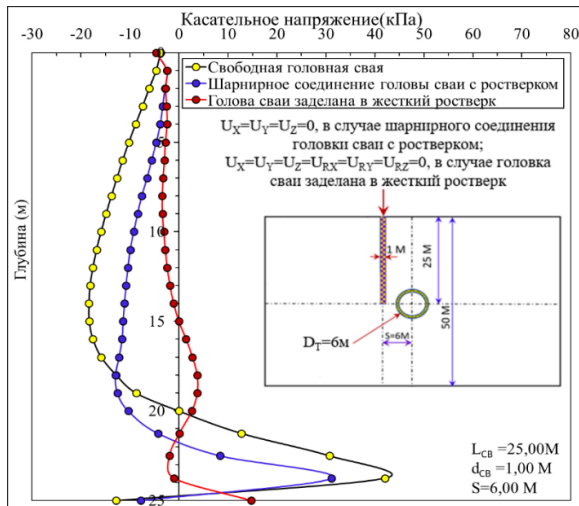


Рисунок 14 - Распределение касательных напряжений по боковым поверхностям свай со свободной головой и при их сопряжении с ростверком ( $L_{CB}=25$  м и  $S=6$  м)

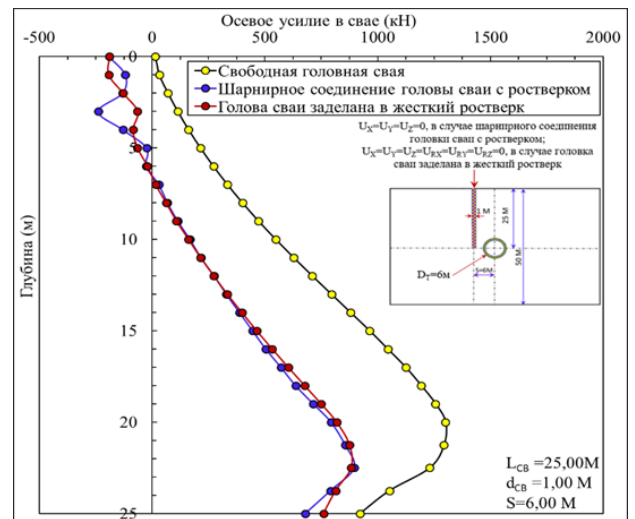


Рисунок 15 - Распределение осевых усилий в сваях со свободной головой и при их сопряжении с ростверком при ( $L_{CB}=25$  м и  $S=6$  м)

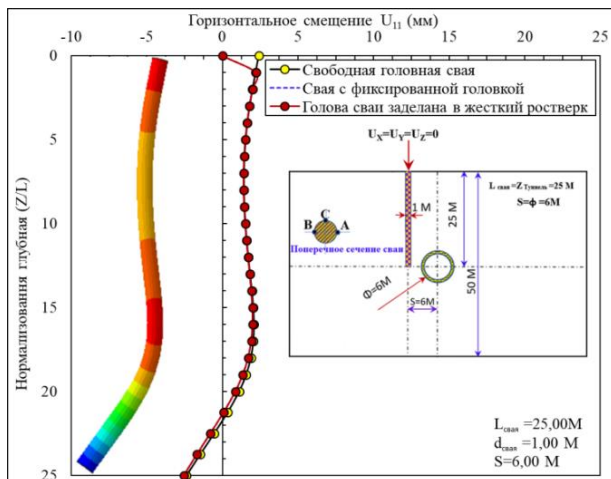


Рисунок 16 - Горизонтальные смещения свай со свободной головой и при их сопряжении с ростверком (при  $L_{CB} = 25$  м,  $S = 6$  м)

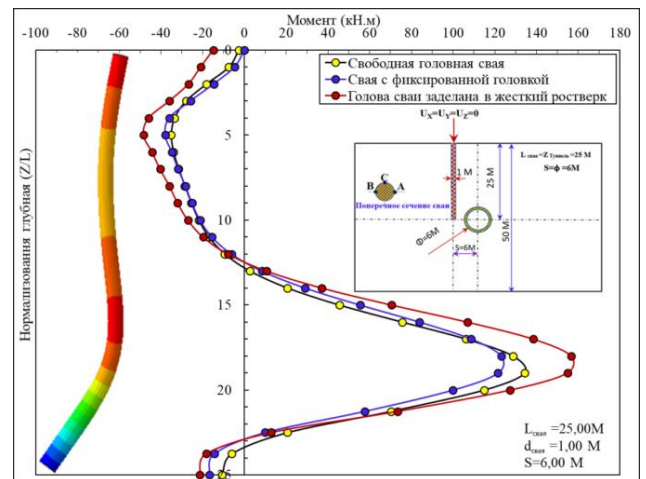


Рисунок 17 - Распределение изгибающих моментов по длине свай со свободной головой и сопряженных с ростверком ( $L_{CB} = 25$  м,  $S = 6$  м)

В целом закономерности влияния проходки тоннеля на работу свай при изменении ее расстояния от тоннеля те же, что и установленные для свай со свободной головой.

### *Математико-статистический анализ результатов численного моделирования*

Математико-статистический анализ результатов проведенного численного моделирования взаимодействия одиночной сваи с оседающим при щитовой проходке тоннеля грунтовым массивом с привлечением доступных результатов исследований по рассматриваемой тематике других авторов выполнен методом регрессионного анализа, основанного, как указывалось выше, на теории планирования эксперимента.

Использовался вариант мультилинейной регрессии, в котором максимальные изгибающие моменты  $M_{\max,cb}$  и максимальные продольные усилия  $Q_{z,\max}$ , развивающиеся в свае со свободной головой в результате проходки тоннеля, рассматривались как зависимые переменных, а геометрические параметры свай, такие как  $L_{CB}$  и  $d_{CB}$ , расстояние по горизонтали от вертикальной оси тоннеля до сваи  $S$ , глубина заложения тоннеля  $Z_T$  и его радиус  $R_T$  и свойства грунта и материала свай, такие как удельный вес грунта ( $\gamma$ ), модуль деформации грунта  $E_{гр}$ , модуль упругости  $E_{cb}$  и коэффициент Пуассона  $\mu_{cb}$  материала свай - как независимые.

Собранные базы данных, включающие в себя как результаты проведенных в диссертации численных исследований, так и доступные данные по аналогичным исследованиям других авторов, позволили с помощью программ SPSS и EXCEL подучить уравнения регрессии (2) и (3) для определения максимальных изгибающих моментов  $M_{\max,cb}$  и максимальных продольных усилия  $Q_{z,\max}$ , развивающихся в сваях со

свободной головой вследствие смещений грунтовой массы, вызванных щитовой проходкой тоннеля.

$$M_{\max.св.} = \left( 0,34 + 2,52 \frac{d_{св}}{S} + 1,52 \frac{R_T}{Z_T} + 1,14 \cdot 10^{-8} \frac{E_{св}}{E_{гр}} \right) \cdot 0,5 \cdot K_0 \cdot \mu_{св}^2 \cdot \pi \cdot d_{св}^2 \cdot L_{св}^2 \cdot \gamma \quad (2)$$

$$Q_{z,\max} = \left( 0,91 + 1,25 \frac{d_{св}}{S} + 0,27 \frac{R}{Z} + 0,00056 \frac{E_{св}}{E_{гр}} \right) 0,5 \cdot K_0 \cdot \mu_{св} \cdot \pi \cdot d_{св} \cdot L^2 \cdot \gamma \quad (3)$$

Оценки эффективности разработанных регрессионных моделей выполнена при помощи таких статистических показателей, как коэффициент детерминации ( $R^2$ ), среднеквадратичная ошибка (RMSE), средняя абсолютная ошибка (AAE), среднее значение (M), стандартное отклонение (SD) и коэффициент вариации (CoV).

Указанные статистические показатели рассчитывались по следующим формулам:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i \text{ прог}} - y_{i \text{ прог}})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{i \text{ прог}} - y_{\text{ср.ожд}})^2} \quad (4)$$

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{y_{i \text{ прог}}}{y_{i \text{ ожд}}}}{n} \quad (5)$$

$$AAE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{i \text{ прог}} - y_{i \text{ ожд}}}{y_{i \text{ ожд}}} \right|}{n} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{i \text{ прог}} - y_{i \text{ ожд}})^2}{n}} \quad (7)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{y_{i \text{ прог}}}{y_{i \text{ ожд}}} - M \right)^2}{n - 1}} \quad (8)$$

$$CoV = \frac{SD}{M} \quad (9)$$

где  $y_{i \text{ прог}}$  - прогнозируемое значение, найденное по уравнению регрессии;  $y_{i \text{ ожд}}$  - ожидаемое (расчетное) значение, полученное из базы данных;  $y_{\text{ср. ожд}}$  - среднее значение параметра в базе данных;  $n$  - количество расчетов. Статистические показатели  $R^2$ ,  $M$ ,  $AAE$  и  $CoV$  для использованной модели множественной линейной регрессии, определенные по вышеприведенным формулам, составили для  $M_{\max.св.}$  0,825, 1,02, 0,22 и 0,287 соответственно, а для  $Q_{z,\max}$  0,6, 1, 0,23 и 0,29, что указывает на хорошее соответствие прогнозируемых значений базе данных. Подтверждает это и полученные в результате комбинированного анализа SPSS графики зависимости прогнозируемых и расчетных значений максимального изгибающего момента и максимального осевого усилия, показанные на

рисунке 18. Точки на графиках достаточно плотно группируются вокруг диагональной линии, (сплошная линия синего цвета), которая соответствует единичному отношению фактических значений максимального изгибающего момента к прогнозируемым (расчетным), что также означает, что полученная модель хорошо согласуется с результатами базы данных.

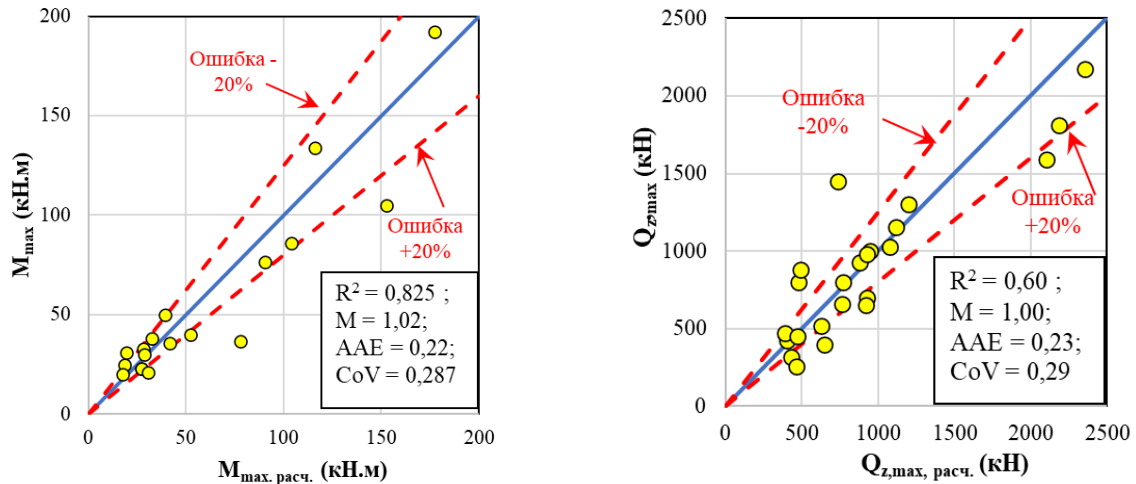


Рисунок 18 - Зависимость между прогнозируемыми и фактическими (ожидаемыми) значениями  $M_{\max, \text{св.}}$  и  $Q_{z, \max}$

Для свай с шарнирным соединением с ростверком и свай, заделанных в ростверк, максимальный изгибающий момент определится по формулам:

- шарнирное соединение с ростверком:

$$M_{\max, \text{hinge.}} = 0,95 M_{\max} \quad (10)$$

- заделка в ростверк:

$$M_{\max, \text{fix.}} = 1,16 M_{\max, \text{lib.}} \quad (11)$$

В формулах (10) и (11) коэффициенты 0,95 и 1,16 были определены по результатам численного моделирования работы свай с учетом типа их соединения с ростверком.

Осадка сваи со свободной головой, частично или полностью расположенной в призме оседающего грунта, может быть определена как:

$$s_{\text{сваи}} = \beta \cdot \frac{Q_{z, \max}}{\pi \frac{d_{\text{св}}^2}{4} \cdot E_{\text{гр}}} Z_{\text{T}} \quad (12)$$

где  $\beta$  – статистический параметр, определяемый регрессионным анализом, как функция  $\left(\frac{L_{\text{св}}}{d_{\text{св}}}, \frac{d_{\text{св}}}{s}\right)$ :

$$\beta = 43,235 - \frac{1,2 L_{\text{св}}}{d_{\text{св}}} + \frac{24,77 d_{\text{св}}}{s} \quad (13)$$

$Q_{z, \max}$  находится из уравнения (3).

С учетом (13) уравнение для определения осадки сваи будет иметь вид:

$$s_{\text{сваи}} = \left(43,235 - \frac{1,2 L_{\text{св}}}{d_{\text{св}}} + \frac{24,77 d_{\text{св}}}{s}\right) \left(0,91 + 1,25 \frac{d_{\text{св}}}{s} + 0,27 \frac{R_{\text{T}}}{Z_{\text{T}}} + 0,00056 \frac{E_{\text{св}}}{E_{\text{гр}}}\right) \cdot \frac{0,5 \cdot K_0 \cdot \mu_{\text{св}} \cdot \pi \cdot d_{\text{св}} \cdot L_{\text{св}}^2 \cdot \gamma}{\pi \frac{d_{\text{св}}^2}{4} \cdot E_{\text{гр}}} Z_{\text{T}} \quad (14)$$

Как и в предыдущих случаях статистические показатели показывают, что полученная модель хорошо согласуется с результатами базы данных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обзор технической литературы и проведенные в диссертационной работе исследования подтвердили факт существенного негативного влияния щитовой проходки подземных тоннелей на техническое и эксплуатационное состояние существующей городской застройки и необходимость совершенствования методов его учета при проектировании проходческих работ.

2. Используемые в настоящее время в практике проектирования методы оценки влияния щитовой проходки тоннелей на фундаменты существующей окружающей застройки позволяют, построив мульду оседания земной поверхности, достаточно надёжно прогнозировать крены и осадки построек на фундаментах мелкого заложения. В случае свайных фундаментов на их работу основное влияние оказывают не осадки земной поверхности, а смещения к тоннелю точек массива грунта в границах призмы его оседания, под воздействием которых в теле сваи формируются значительные дополнительные внутренние усилия и деформации, способные привести к ее разрушению, что подтверждается численными и модельными исследованиями, но не нашло отражения в нормативных документах и явилось одной из причин проведения дополнительного изучения этого вопроса.

3. Совершенствование методики учета влияния щитовой проходки тоннелей на работу фундаментов существующей застройки должно осуществляться на основе исследований, проводимых по двум направлениям: исследований процесса формирования перемещений грунтового массива при движении щита и исследований влияния указанных перемещений на работу расположенных рядом с тоннелем фундаментов, включая свайные.

4. Выполненные в диссертации исследования показали, что моделирование влияния щитовой проходки тоннелей на окружающую застройку необходимо проводить в трёхмерной постановке. Это обусловлено тем, что после схода щита со смонтированного кольца обделки осадки грунта за щитом значительно увеличиваясь принимают максимальное значение на некотором расстоянии от него. Согласно проведенным расчетам, указанное расстояние составляет (3,0 – 3,5) диаметра щита, что согласуется с результатами ряда зарубежных исследований.

5. Для моделирования в конечно-элементной сетке поля перемещений грунта, вызванного работой щита, в диссертации предлагается метод, основанный на определении величины объёма «потерянного» грунта -  $V_L$  (объёма грунта, смещающегося в направлении движения работающего щита). Величина  $V_L$  позволяет определить величину  $g_L$  – ширину эквивалентного зазора между контуром выработки и оболочкой щита, смыкание которого

позволяет в конечно–элементном расчёте моделировать изменение поля перемещений, вмещающего тоннель, грунтового массива.

6. Полученные на основе регрессионного анализа результатов численного моделирования в трехмерной постановке уравнения позволяют рассчитать как вызванные проходческими работами, осадки земной поверхности, так и поле перемещений грунтового массива в пределах глубины заложения тоннеля, что позволяет выполнить предварительную оценку дополнительных осадок и кренов зданий и сооружений на фундаментах мелкого заложения, деформаций полотна автомобильных дорог, инженерных коммуникаций и т.п. Адекватность уравнений подтверждается значением коэффициента детерминации ( $r^2 = 0.81 \geq 0,8$ ).

7. По результатам выполненного численного моделирования установлен факт существенного влияния щитовой проходки тоннеля метрополитена на напряженно-деформированное состояние сваи, служащей отдельной опорой или входящей в состав фундамента существующего над ним здания или сооружения. Это влияние является следствием воздействия на сваю оседающего при проходке тоннеля грунта, что приводит к развитию на ее боковой поверхности сил трения, которые догружают сваю, в ее стволе возникают дополнительные внутренние усилия (осевые усилия и изгибающие моменты), свая получает горизонтальные и вертикальные смещения.

8. Установлено, что основными факторами, влияющими на интенсивность развития осевых (продольных) усилий и изгибающих моментов в свае, а также ее горизонтальные и вертикальные смещения, вызванные оседающим грунтом при щитовой проходке тоннеля, являются расположение нижнего конца сваи относительно уровня центральной оси тоннеля (выше, ниже, на одном уровне), расстояние по горизонтали между сваем и вертикальной осью тоннеля и способ сопряжения сваи с ростверком (свободная голова, шарнирное соединение, жесткая заделка).

9. Максимальный изгибающий момент, горизонтальное смещение (прогиб), сваи и ее осадка резко уменьшаются (почти на 50 %) с увеличением расстояния между тоннелем и сваем с  $1d_{св}$  до  $1,5 d_{св}$ . Снижение отклика сваи становится менее значительным при переходе от  $1,5 d_{св}$  к  $2 d_{св}$ .

10. Сопряжение головы сваи с ростверком приводит к снижению касательных напряжений на ее боковой поверхности по сравнению со сваем со свободной головой и, как следствие, к снижению осевых усилий в ее стволе. Тип сопряжения (шарнир или заделка) не влияет на величину горизонтального смещения сваи, но оказывает заметное влияние на изгибающие моменты в ее стволе. При жесткой заделке головы сваи в ростверк они существенно больше.

11. Использованный в диссертационной работе регрессионный анализ показал эффективность его применения для прогнозирования напряженно-деформированного состояния свай, подверженных воздействию на них подвижек грунта, вызванных щитовой проходкой тоннеля метрополитена. Статистические показатели  $R^2$ ,  $M$ ,  $AAE$  и  $COV$  математической модели мультилинейной регрессии, показали их удовлетворительную сходимость с

результатами собранной базы данных, включающей как результаты выполненного численного моделирования, так и результаты исследований, других авторов, полученных, в том числе, и в условиях натурных экспериментов.

12. Полученные в результате проведенного численного исследования данные и аналитические зависимости, отражающие влияния щитовой проходки тоннеля метрополитена на поведение свай фундаментов зданий и сооружений, расположенных в зоне проходческих работ, и степени этого влияния в зависимости от различных факторов могут быть использованы для определения несущей способности и осадок свай, догруженных отрицательным трением, вызванным оседающим грунтом, а также проверки прочности ствола свай на сжатие и изгиб при общей оценке последствий проходки тоннелей на фундаменты зданий и сооружений окружающей застройки, что позволит обеспечить их эксплуатационную надежность

#### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.**

В дальнейшем предполагается развитие темы в направлении изучения влияния щитовой проходки подземных тоннелей на работу свайных кустов и полей, и разработку методики расчета дополнительных осадок зданий и сооружений на различных типах фундаментов (мелкого заложения и свайных), расположенных в зоне влияния проходческих работ.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛЕКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:**

1. Знаменская, Е. А. Исследование влияния щитовой проходки тоннеля метрополитена на окружающую городскую застройку / Е. А. Знаменская, М. Г. Зерцалов // Инновации и инвестиции. – 2022. – № 6. – С. 167-170.
2. Знаменская, Е. А. Исследование влияния щитовой проходки тоннеля на работу одиночной сваи / Е. А. Знаменская, О. М. Хегази, Д. А. Сайед // Инновации и инвестиции. – 2022. – № 2. – С. 208-213.ъ
3. Знаменская Е.А. Напряженно-деформированное состояния свай, вызванное выемкой грунта при проходке тоннеля метрополитена //Инновации и инвестиции. – 2023. – №.3 – С.247 –251.
4. Знаменская Е.А. Расчёт осадок земной поверхности в зоне влияния механизированной проходки тоннеля при движении щита / Знаменская Е. А., Зерцалов М.Г. //Инновации и инвестиции. – 2023. – №.7 – С.333 –338.
5. Знаменская Е.А. Численное моделирование влияния механизированной щитовой проходки на деформирование, вмещающего тоннель, грунтового массива / Знаменская Е. А., Зерцалов М.Г. //Инновации и инвестиции. – 2023. – №.11 – С.389 –392.

**Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:**

1. Знаменская, Е. А. Исследование влияния щитовой проходки тоннеля метрополитена на работу одиночной сваи выполненное в рамках исследования влияния щитовой проходки на свайные фундаменты / Е. А. Знаменская, В. А. Дубин // Перспективы науки. – 2021. – № 3(138). – С. 179-184.

2. Знаменская, Е. А. Учет сжимаемости ствола одиночной забивной сваи при расчете ее осадки / Е. А. Знаменская // Перспективы науки. – 2020. – № 3(126). – С. 127-1.