

На правах рукописи



ЛЕ ТХЮЙ ЗЫОНГ

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СВАЙ В СЛАБЫХ ГРУНТАХ С УЧЕТОМ РАЗВИТИЯ
СИЛ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ТРЕНИЯ ВЫЗВАННЫХ ВОДОПониЖЕНИЕМ**

2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2023

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Знаменский Владимир Валерианович

Официальные оппоненты: **Полищук Анатолий Иванович**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», кафедра оснований и фундаментов, заведующий кафедрой

Скориков Андрей Викторович
кандидат технических наук,
акционерное общество «Научно-исследовательский центр «Строительство», Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеева, лаборатория методов расчета подземных сооружений и геотехнического прогноза №7, заведующий лабораторией

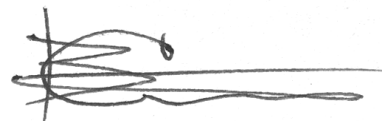
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»

Защита состоится «14» июня 2023 г. в 12:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.05 (Д 212.138.14), созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ) по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Зал Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26 и на официальном сайте: www.mgsu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



(подпись ученого секретаря)

/Сидров Виталий Валентинович/

(Ф.И.О. ученого секретаря)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. Одной из причин ухудшения условий работы свай в слабых грунтах является развитие сил отрицательного трения на их боковой поверхности, на что еще шестьдесят лет назад обратил внимание К.Терцаги. Отрицательное трение возникает вследствие оседания окружающей массы грунтов относительно свай, что может быть вызвано различными причинами: в результате планировки строительных площадок путем подсыпки с целью повышения отметки территории, нагружения поверхности грунта длительно действующими полезными нагрузками, водопонижения и др.

Так, за последние десятилетия в прибрежных районах г. Ханой (Вьетнам) на территориях, отвоеванных у моря, интенсивно развивается городское строительство с возведением большого числа зданий повышенной этажности на буровых сваях. Одновременно с этим развитие городского хозяйства и коммерческая деятельность предприятий потребовали откачек больших объемов пресной воды, что привело к существенному понижению уровня подземных вод. Сваи на этой территории подверглись воздействию отрицательных сил трения, которые увеличили осевую нагрузку на них и вызвали дополнительную, в ряде случаев катастрофическую, осадку возведенных зданий и сооружений. С аналогичной проблемой столкнулись и во многих других городах мира, например на Тайване, где за последние два десятилетия также процветали внутренние рыбные хозяйства, требующие больших откачек пресной воды.

В сложившейся ситуации вопрос оценки догружающих свай сил отрицательного трения, вызванных понижением уровня подземных вод, приобретает для территорий, подверженных водооткачкам, исключительное значение.

На основании изложенного тему диссертации, посвященную исследованию работы свай в слабых водонасыщенных грунтах с учетом развития сил отрицательного трения на их боковой поверхности, вызванных водопонижением, и разработке метода их учета при проектировании свайных фундаментов, следует считать актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Особенности развития отрицательного трения на боковых поверхностях свай, его оценке и учету при проектировании свайных фундаментов посвящен ряд отечественных и зарубежных работ (Акопян В.Ф., Далматов Б.И., Знаменский В.В., Лапшин Ф.К., Пилягин А.В., Тер-Мартиросян З.Г., Фадеев А.Б., Buisson M, Crawford C.B., Endo M., Fellenius B.H., Sayed D.A., Zeevaert L., Maugeri, Leung, Lam S. Y, Lv Y. R., Lee C.J., Chen R.P., Sujawat S., Giridhar Rajesh B., Terzaghi K., Во Фан, Ле Фьонг, Во Нгок Ха, Hegazy O.M., Фи Х.Т.), подавляющее большинство которых рассматривало отрицательное трение как результат оседания грунтового массива под

действием нагружения его поверхности. В такой постановке этот вопрос был наиболее полно изучен в Ленинградском инженерно-строительном институте под руководством проф., д.т.н. Б.И.Далматова, а разработанный на основе проведенных исследований инженерный метод учета сил отрицательного трения, вызванных пригрузкой поверхности грунтового массива, позволил выполнять расчеты несущей способности и осадок свай с достаточной для практических целей точностью. Что касается учета сил отрицательного трения, вызванных водопонижением, то этот вопрос рассматривался в работах С.Л. Lee and С.В. Chen и N. Kiprotich, но детально не исследовался и в нормативных документах не отражен, а проблема существует.

Изложенное позволило определить цель и наметить задачи исследования диссертационной работы.

Цель диссертационной работы - исследование влияния водопонижения на развитие сил отрицательного трения на боковой поверхности сваи в слабом водонасыщенном глинистом грунте и разработка инженерного метода их учёта при расчете несущей способности сваи.

Задачи исследования:

1. Обобщение и анализ опубликованных результатов изучения развития сил отрицательного трения на боковых поверхностях свай, в т.ч. вызванных водопонижением, и методов их учета при проектировании свайных фундаментов.
2. Исследование динамики и закономерностей развития сил отрицательного трения и осевых усилий в свае при водопонижении.
3. Анализ результатов выполненных численных исследований, определение положения «нулевой точки».
4. Математико-статистический анализ влияния различных факторов на положение «нулевой точки».
5. Разработка инженерной методика учета водопонижения при определении несущей способности сваи.

Объект исследования – одиночная свая, работающая в условиях оседания окружающего грунта, вызванного понижением уровня подземных вод.

Предмет исследования

Силы отрицательного трения на боковой поверхности одиночной сваи, вызванные оседанием окружающего грунта при водопонижении.

Научная новизна работы заключается:

- в установлении закономерностей влияния понижения уровня подземных вод на развитие сил отрицательного трения на боковой поверхности буровых свай и осевых усилий по их длине в слабых глинистых грунтах;

- в установлении закономерностей изменения глубины расположения «нулевой точки» в зависимости от различных факторов (уровня понижения подземных вод, длины сваи и ее диаметра, соотношения модулей деформации грунта вдоль боковой поверхности сваи и под ее нижним концом, модуля деформации материала сваи и величины действующей вертикальной нагрузки);

- в получении аналитических зависимостей (уравнений регрессии), связывающих глубину расположения «нулевой точки» с перечисленными факторами и их сочетаниями;

- в разработке инженерной методики определения несущей способности буровой сваи с учетом сил отрицательного трения, вызванных понижением уровня подземных вод.

Теоретическая значимость работы

На основе математического моделирования получены уравнения регрессии, позволяющие определять глубину развития сил отрицательного трения на боковой поверхности буровых свай, вызванных оседанием грунта при водопонижении, в зависимости от влияющих на нее факторов и их сочетаний.

Практическая значимость работы заключается:

- в возможности определения несущей способности сваи с учетом ее снижения при понижении уровня подземных вод;

- в возможности выполнения прогноза снижения несущей способности свайного фундамента при понижении уровня подземных вод и установления его допустимого уровня;

- в определении допустимых объемов откачек пресной воды для бытовых и коммерческих нужд на территориях, сложенных слабыми водонасыщенными грунтами, при массовом строительстве на них зданий на свайных фундаментах, что характерно для города Ханой;

- в возможности выполнить расчеты по разработанной методике с использованием специальных номограмм, что существенно сокращает время проектирования;

- в возможности использования результатов проведенных исследований и разработанной методики расчета для актуализации нормативных документов в области геотехники, в частности, региональных строительных норм г. Ханой.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационного исследования являлись труды отечественных и зарубежных ученых, технологов,

проектировщиков и строителей в области геотехники. В диссертационной работе применялись следующие методы:

- анализ литературных источников по тематике диссертационной работы;
- численное моделирование работы буровой сваи в оседающем вследствие понижения уровня подземных вод грунте;
- статистический анализ влияния понижения уровня подземных вод, размеров сваи, действующей на нее вертикальной нагрузки, сжимаемости ствола сваи и грунтовых условий на положение «нулевой точки», определяющей глубину развития сил отрицательного трения на боковой поверхности свай.

Область исследования. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.1.2 – «Основания и фундаменты, подземные сооружения» пункту 2: «Создание научных и методологических основ фундаментостроения и подземного строительства в сложных инженерно-геологических, гидрогеологических и природно-климатических условиях, а также при особых природных и техногенных воздействиях», пункту 10 «Разработка научных основ и основных принципов обеспечения безопасности нового строительства и реконструкции объектов в условиях сложившейся застройки, в том числе для исторических памятников, памятников архитектуры и др.» и пункту 12: «Разработка научных основ, методов и конструктивных решений защиты территорий, а также конструктивных решений оснований и фундаментов, реализующих функцию защиты зданий и сооружений от опасных природных и техногенных воздействий».

Достоверность результатов проведенных в диссертационной работе исследований подтверждается применением основных положений моделей поведения материалов, применяемых в механике грунтов, математической статистики, использованием современных комплексов и методик обработки экспериментальных данных, непротиворечием полученных результатов имеющимся данным о развитии сил отрицательного трения по боковым поверхностям свай в оседающем грунте.

Личный вклад автора диссертации заключается в следующем:

- разработана методика и программа проведения численного эксперимента по изучению влияния понижения уровня подземных вод на динамику развития и распределение сил трения на боковой поверхности сваи, и зависимости этого влияния от различных факторов;
- выполнено численное моделирование работы сваи в оседающем грунте методом конечных элементов с использованием программного комплекса PLAXIS-2D;

- выполнен математико-статистический анализ степени влияния рассмотренных факторов на распределение сил трения на боковой поверхности сваи, характеризующее положением «нулевой точки», и осевых усилий по ее длине;

- получено уравнение (уравнение регрессии), позволяющее определить глубину расположения «нулевой точки» в зависимости от влияющих на нее факторов и их сочетаний;

- предложен инженерный метод расчета несущей способности сваи в оседающем грунте с использованием разработанного пакета номограмм для определения глубины расположения «нулевой точки» в зависимости от рассмотренных факторов.

На защиту выносятся:

1. Методика и результаты численного моделирования распределения сил трения на боковой поверхности сваи и осевых усилий по ее длине, вызванных понижением уровня подземных вод.

2. Установленные закономерности изменения сил трения на боковой поверхности сваи и осевых усилий по ее длине при водопонижении.

3. Методика выполнения и результаты математико-статистического анализа степени влияния уровня водопонижения, длины сваи, ее диаметра и характеристик грунтового основания на распределение сил трения на боковой поверхности сваи и осевых усилий по ее длине.

4. Номограммы для определения глубины расположения «нулевой точки».

5. Инженерная методика определения несущей способности сваи, учитывающая действие сил отрицательного трения на ее боковой поверхности, вызванных водопонижением.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были рассмотрены и обсуждены:

- на международной научной конференции «Строительство, Гидротехника, Водные ресурсы» (CONMECHYDRO – 2020), которая состоялась в г. Ташкент (Узбекистан) с 23 по 25 апреля 2020 г.;

- на традиционной Геотехнической конференции на базе СПбГАСУ «Современные теоретические и практические вопросы геотехники: новые материалы, конструкции, технологии и методики расчетов» GFAC 2021 27 – 29 октября 2021 г.

Публикации. Материалы диссертации подробно представлены в 3 научных публикациях, из которых 2 работа опубликована в рецензируемых журналах из перечня, рекомендованного ВАК Министерства образования и 1 работа в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus.

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

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 145 наименований, содержит 128 страниц, 47 рисунков и 23 таблиц.

Диссертационная работа выполнена на кафедре Механики грунтов и геотехники Московского государственного строительного университета.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.т.н., профессору Знаменскому Владимиру Валериановичу и всему коллективу кафедры за внимание и помощь при работе над диссертацией.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, отражена степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследований, отмечена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены особенности инженерно-геологических условий расположенного в рифтовой зоне реки Красная города Ханой, характеризующих распространение мощных толщ слабых водонасыщенных глинистых грунтов, приведены сведения о практике применения свайных фундаментов при возведении зданий и сооружений на его территории. Рассмотрены вопросы возникновения и развития догружающих свай сил отрицательного трения на их боковой поверхности, вызванных оседанием грунта вследствие понижения уровня подземных вод из-за откачек больших объемов пресной воды для хозяйственных и коммерческих нужд города. Приведены примеры аварий, вызванных этими силами.

Отдельно рассмотрены условия и механизм возникновения и развития отрицательного трения, результаты экспериментальных и аналитических исследований отечественных и зарубежных ученых и специалистов по изучению его влияния на несущую способность свай, а также методы его учета при расчете и проектировании свайных фундаментов в условиях оседающей по различным причинам грунтовой толщи. Обоснована необходимость проведения дальнейших исследований работы свай при оседании грунта, вызванного понижением уровня подземных вод, как наименее изученного вопроса.

В выводах по главе сформулированы цель и задачи экспериментальных и аналитических исследований диссертации, направленных на решение этой проблемы.

Вторая глава посвящена исследованию работы свай в оседающей вследствие водопонижения толще слабого глинистого грунта. Исследование выполнялось численным методом (методом конечных элементов) в программном комплексе PLAXIS-2D.

Рассматривалась буровая свая, помещенная на всю ее длину в слабый водонасыщенный глинистый грунт, равный по мощности длине сваи и подстилаемый слоем песчаного грунта, как это показано на Рисунке 1а. Ситуация является типичной для условий строительства в городе Ханой.

Разбивка конечно-элементной сетки и граничные условия (закрепленные опоры с боковых сторон и снизу расчетной области) показана на Рисунке 1б.

Слабая глина и песок моделировались моделью Hardening-soil, буровая свая – линейно-упругим материалом. Для имитации сил трения по боковой поверхности сваи устанавливался контактный элемент – интерфейс (Рисунок 2).

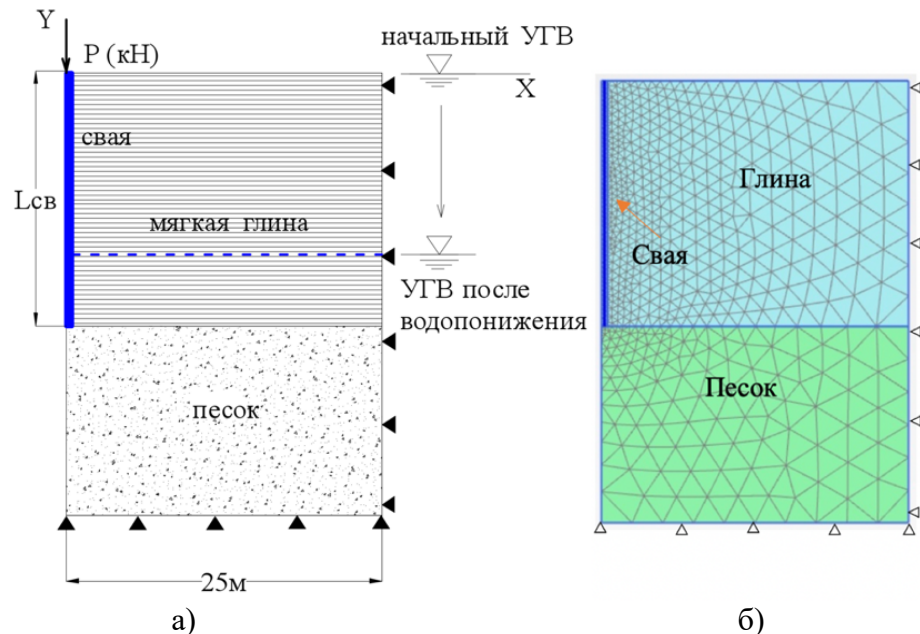


Рисунок 1 – Расчетная схема (а) и 2D схема конечно-элементной модели (б)



Рисунок 2 - Работа контактного элемента

Характеристики материалов при проведении моделирования приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Конститутивные модели и параметры материала

	Глина	Песок	Свая
Модель	Hardening-soil	Hardening-soil	Linear elastic
γ_{unsat} (кН/м ³)	16	19,5	25
γ_{sat} (кН/м ³)	16,5	20	-
E (кН/м ²)	$8 \cdot 10^3$	$24 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^7$
E_{50} (кН/м ²)	$8 \cdot 10^3$	$24 \cdot 10^3$	-
E_{oed} (кН/м ²)	$8 \cdot 10^3$	$24 \cdot 10^3$	-
E_{ur} (кН/м ²)	$24 \cdot 10^3$	$72 \cdot 10^3$	-
e_0	0,6	0,5	-
C (кПа)	40	2	-
φ	14	38	-
ψ	0	8	-
ν	0,35	0,3	0,2

Примечания:

1. Секущий модуль деформации E_{50} принят равным модулю деформации E, модуль деформации при разгрузке $E_{\text{ur}} = 3E_{50}$, касательный модуль первичной компрессии $E_{\text{oed}} = E_{50}$ (Фадеев А.Б.).
2. Приведенные в таблице модули деформации песчаного грунта соответствуют расчетному случаю $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}=3$.

Начальный уровень подземных вод задавался у поверхности грунта и последовательно снижался до глубины, составляющей (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0) $L_{\text{св}}$.

Расчеты выполнялись для ненагруженной и нагруженной сваи с учетом сжатия ее ствола.

Программа параметрических исследований приведена в Таблице 2.

Таблица 2. Программа параметрических исследований

1 - Диаметр сваи, $D_{\text{св}}$ (м)	0,6; 0,8; 1,0
2 - Длина сваи, $L_{\text{св}}$ (м)	15,0; 17,5; 20,0
3 – Относительная глубина водопонижения, $h_w/L_{\text{св}}$	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0
4 – Степень нагружения сваи, $P_{\text{св}}/F_d$	0,0; 0,4; 0,6; 0,8
5 – $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}$	1; 2; 3;4

Примечание: F_d - несущая способность сваи без учета водопонижения; $E_{пес}$ – модуль деформации песчаного грунта под нижним концом сваи; $E_{гл}$ – модуль деформации глинистого грунта, прорезаемого свайей.

Верификация разработанной конечно-элементной модели с целью проверки возможности ее использования для проведения намеченных исследований выполнялась путем сравнения результатов численного моделирования с результатами моделирования на центрифуге (Lee, 2003). В расчете на натуральные размеры в центрифуге моделировалась работа сваи диаметром $D_{св} = 1,5\text{м}$, длиной $L_{св} = 22,5\text{м}$. Сравнение результатов 2D-моделирования с результатами моделирования на центрифуге показало их хорошую корреляцию (Рисунок 3) и возможность использования разработанной модели для проведения намеченных Программой исследований влияния различных факторов на развитие сил отрицательного трения и положения «нулевой точки» при водопонижении.

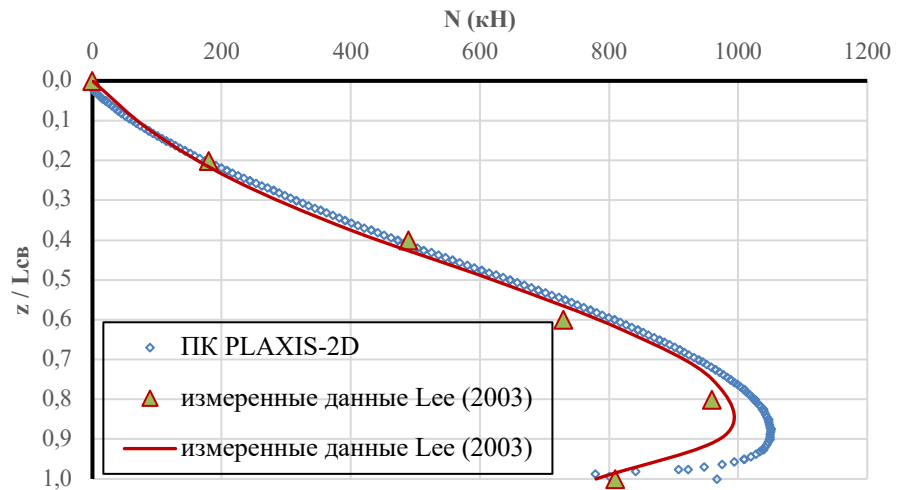


Рисунок 3 - Сравнение результатов численного моделирования в ПК PLAXIS-2D с результатами моделирования на центрифуге (Lee, 2003)

Результаты проведенных исследований

На Рисунке 4 на примере сваи длиной 17,5м, диаметром 0,8м показаны полученные выполненными расчетами графики изменения относительных смещений «свая – грунт» в зависимости от нормализованной глубины $z/L_{св}$ для различных значений нормализованной глубины водопонижения $h_w/L_{св}$ при отношении $E_{пес}/E_{гл} = 3$, а на Рисунке 5 - эпюры распределения сил трения на боковой поверхности сваи (а) и продольных усилий N в ее стволе (б).

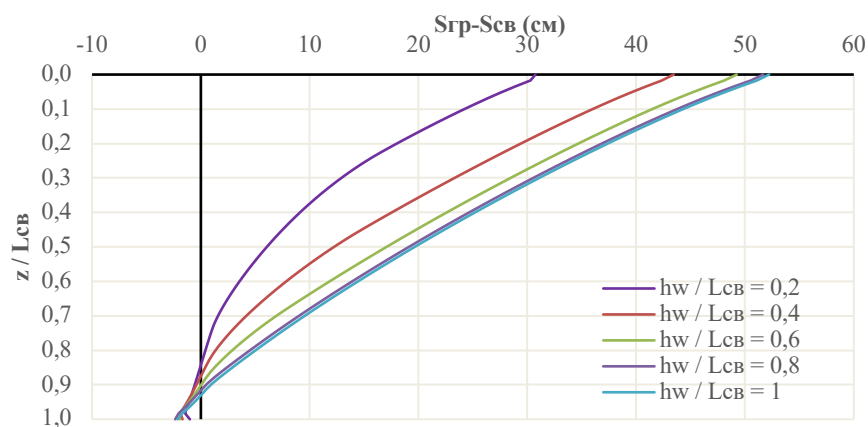


Рисунок 4 – Изменение относительных смещений «свая – грунт»

Графики показывают, что смещение грунта относительно сваи интенсивно снижается с глубиной, особенно в пределах первой половине ее длины. Это характерно для любой глубины водопонижения, но разница между смещениями грунта и сваи уменьшается по мере увеличения длины сваи.

Эпюры распределение сил трения на боковой поверхности сваи и продольных усилий по ее длине соответствуют описанным Далматовым Б.И., Лапшиным Ф.К. и Россихиным Ю.В. (1975), рассматривавшим оседание грунтовой толщи, вызванной пригрузкой ее поверхности.

«Нулевые точки», полученные в выполненных для разных уровней водопонижения расчетах, в рассмотренных грунтовых условиях относительно компактно расположены в нижней трети сваи, однако надо отметить, что их расположение зависит от многих факторов, основными из которых при одном и том же уровне водопонижения являются характеристики сжимаемости грунта вдоль боковой поверхности сваи и под ее нижним концом.

Графики изменения относительных смещений «свая – грунт» вдоль ствола сваи, распределения касательных сил трения по боковой поверхности сваи и продольных усилий в ее стволе, полученные для других, рассмотренных в диссертационной работе длин и диаметров свай и соотношений модулей деформации грунта под нижним концом сваи и вдоль ее боковой поверхности, идентичны представленным на рисунках 4, 5.

Графики изменения относительных смещений «свая – грунт» вдоль ствола сваи и эпюры распределение сил трения на боковой поверхности сваи и продольных усилий по ее длине для нагруженных свай, аналогичны полученным для ненагруженных свай, но «нулевые точки», при прочих равных условиях, расположены несколько выше.

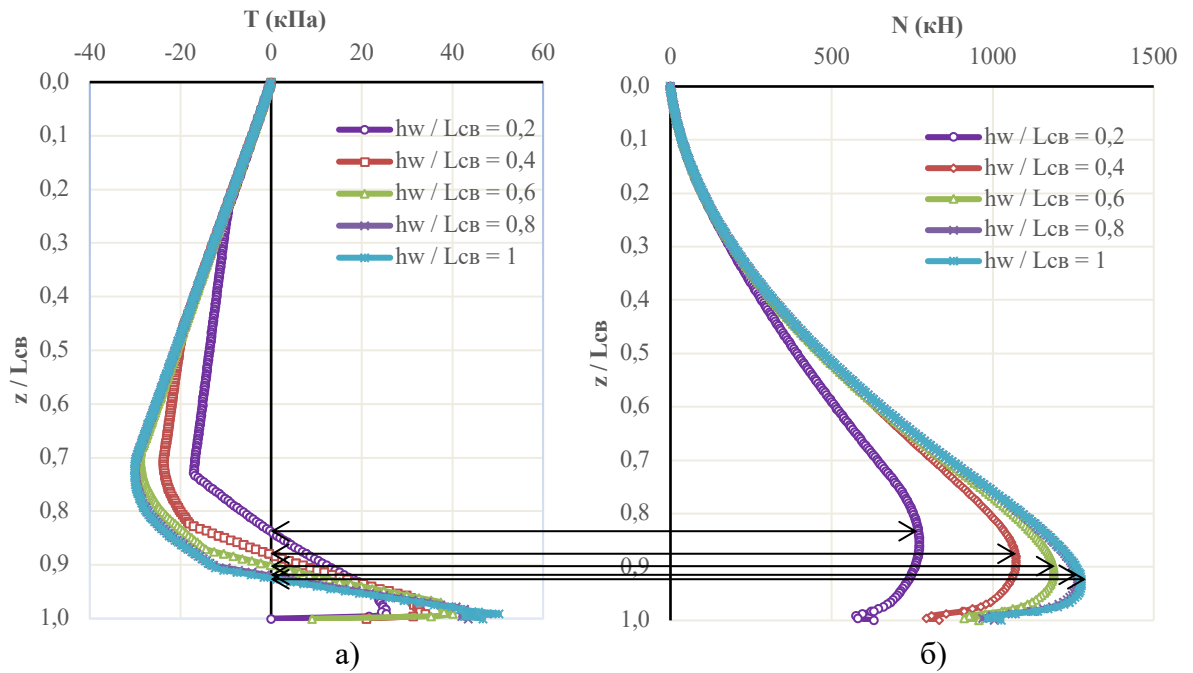


Рисунок 5 – Распределение сил трения на боковой поверхности сваи (а) и продольных усилий по ее длине (б) ($L_{св} = 17,5\text{м}$; $D_{св} = 0,8\text{м}$, $E_{пес}/E_{гл} = 3$)

Полная информация о результатах расчетов положения «нулевой точки» (z_0 , $z_0/L_{св}$), максимальных осевых усилий в свае (N_{max}) и нагрузок, передающихся на грунт через ее нижний конец (N_L), выполненных как для ненагруженных, так и нагруженных внешней вертикальной силой свай различной длины и диаметра при различных соотношениях $E_{пес}/E_{гл}$, приведены в Приложениях к Диссертации.

Эпюры распределение сил трения на боковой поверхности сваи и продольных усилий по ее длине в случае нагруженных свай аналогичны полученным при расчете ненагруженных свай, однако у нагруженных свай, при прочих равных условиях, «нулевые точки» расположены несколько выше. Это связано с тем, что вертикальная нагрузка вызывает осадку сваи, уменьшая относительное смещение грунта относительно сваи, и, как следствие, повышение глубины расположения «нулевой точки».

Параметрический анализ результатов исследования

Влияние глубины понижения уровня подземных вод $h_w/L_{св}$ на снижении несущей способности сваи

В Таблице 3 приведены данные о степени снижении несущей способности свай различной длины и диаметра в рассмотренных грунтовых условиях в результате водопонижения, за которую принято отношением: $U = (F_d - F_d^*)/F_d$ (%), где F_d – несущая способность сваи до водопонижения, определенная по ПК PLAXIS-2D; F_d^* – несущая способность сваи с учетом действия сил отрицательного трения.

Таблица 3 – Снижение несущей способности сваи, вызванное водопонижением

Характеристики сваи		$U = (F_d - F_d^*) / F_d$ (%) при $h_w/L_{св}$				
		0,2	0,4	0,6	0,8	1
$L_{св}=15\text{м}$	$D_{св}=0,6\text{м}$	1,77	14,37	25,79	33,86	38,39
	$D_{св}=0,8\text{м}$	1,50	10,65	18,88	25,05	28,22
	$D_{св}=1\text{м}$	0,73	8,00	14,18	18,91	21,09
$L_{св}=17,5\text{м}$	$D_{св}=0,6\text{м}$	2,32	17,86	30,71	38,93	43,39
	$D_{св}=0,8\text{м}$	1,66	13,95	24,09	30,40	34,88
	$D_{св}=1\text{м}$	0,78	10,64	19,25	25,51	29,26
$L_{св}=20\text{м}$	$D_{св}=0,6\text{м}$	3,47	20,23	32,76	42,00	46,82
	$D_{св}=0,8\text{м}$	2,40	15,61	26,42	33,79	38,59
	$D_{св}=1\text{м}$	1,72	12,70	22,26	29,00	33,23

Приведенные в Таблице 3 данные показывают существенное снижение несущей способности сваи в результате развития отрицательного трения на ее боковой поверхности, вызванного понижением уровня подземных вод. Уже при глубине водопонижения 0,6 $L_{св}$ степень снижения несущей способности сваи в зависимости от ее длины и диаметра может составлять порядка 30%, а при понижении уровня подземных вод на всю длину сваи степень снижения несущей способности сваи длиной более 17,5 м может быть более 40%. В целом степень снижения несущей способности сваи U увеличивается с глубиной водопонижения и длины сваи и уменьшается по мере увеличения ее диаметра. Следует также отметить, что с увеличением отношения $E_{нес}/E_{гл}$ степень снижения несущей способности сваи, вызванного понижением уровня подземных вод, будет увеличиваться. Для наглядности некоторые из установленных зависимостей показаны в графическом виде на Рисунках 6.

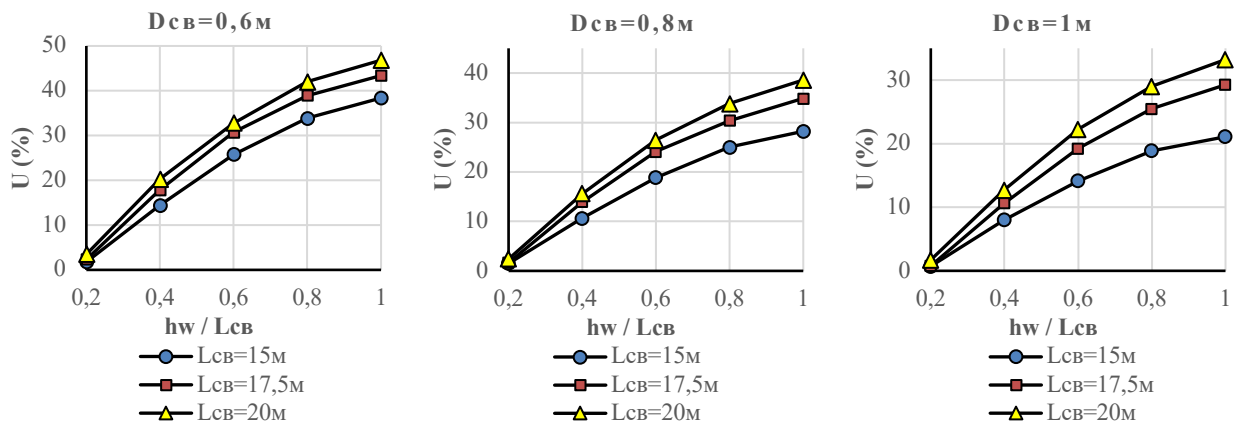


Рисунок 6 – Зависимость степени снижения несущей способности сваи U от нормализованной глубины понижения уровня подземных вод $h_w/L_{св}$ для различных длин и диаметров свай

Влияние глубины понижения уровня подземных вод $h_w/L_{св}$ на положение «нулевой точки»

На Рисунке 7 приведены графики, отражающие зависимость глубины расположения «нулевой точки» от глубины понижения уровня подземных вод для различных длин $L_{св}$ и диаметров сваи $D_{св}$ и отношений $P_{св}/F_d$ и $E_{пес}/E_{гл}$. Графики показывают, что во всех рассмотренных случаях глубина расположения «нулевой точки» z_0 увеличивается с увеличением глубины понижения уровня подземных вод h_w и жесткости грунта под нижним концом сваи, характеризуемой отношением $E_{пес}/E_{гл}$, и уменьшается с увеличением длины и диаметра сваи и нагрузки на ее голову.

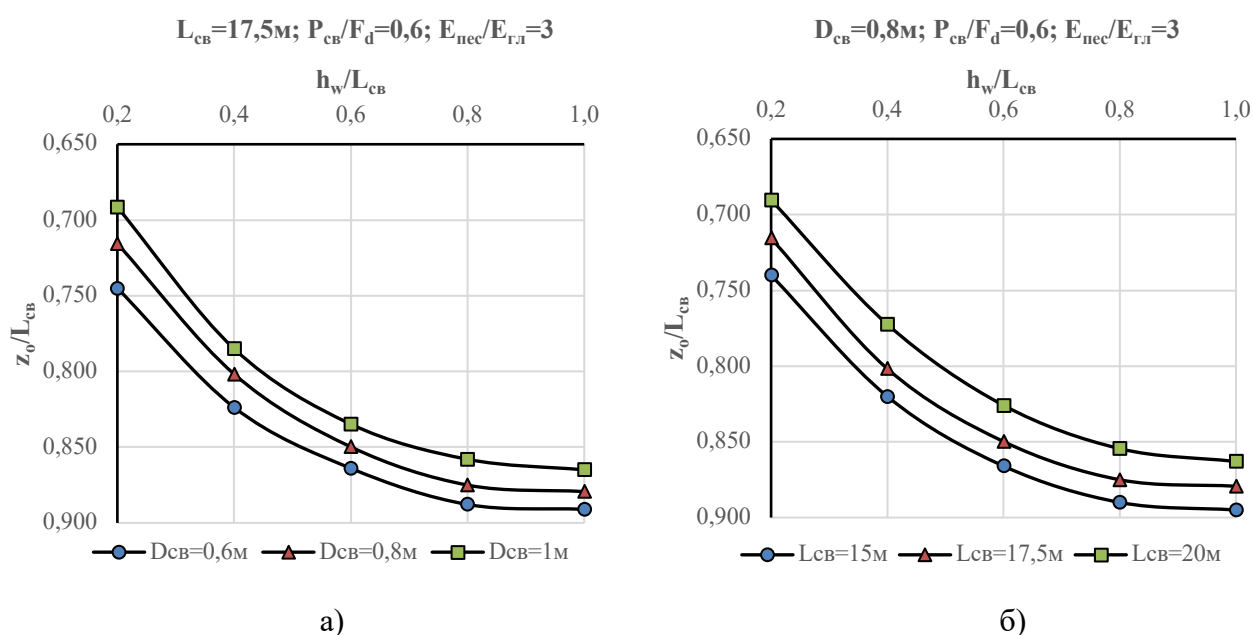


Рисунок 7 – Графики зависимости $z_0/L_{св} = f(h_w/L_{св})$:

а) для различных $D_{св}$; б) для различных $L_{св}$

Влияние глубины понижения уровня подземных вод $h_w/L_{св}$ на максимальное продольное усилие N_{max} в стволе сваи

На Рисунке 8 приведены графики зависимости максимальных осевых (продольных) усилий в свае N_{max} от глубины понижения уровня подземных вод для различных длин $L_{св}$ и диаметров сваи $D_{св}$ и отношений $P_{св}/F_d$ и $E_{пес}/E_{гл}$. Графики показывают, что максимальные осевые усилия в сваях увеличиваются с увеличением глубины водопонижения, длины и диаметра сваи, модуля деформации грунта под ее нижним концом и действующей вертикальной нагрузки. Наибольшую интенсивность увеличения осевых усилий в сваях вызывает увеличение жесткости грунта под ее нижним концом, характеризуемой отношением $E_{пес}/E_{гл}$.

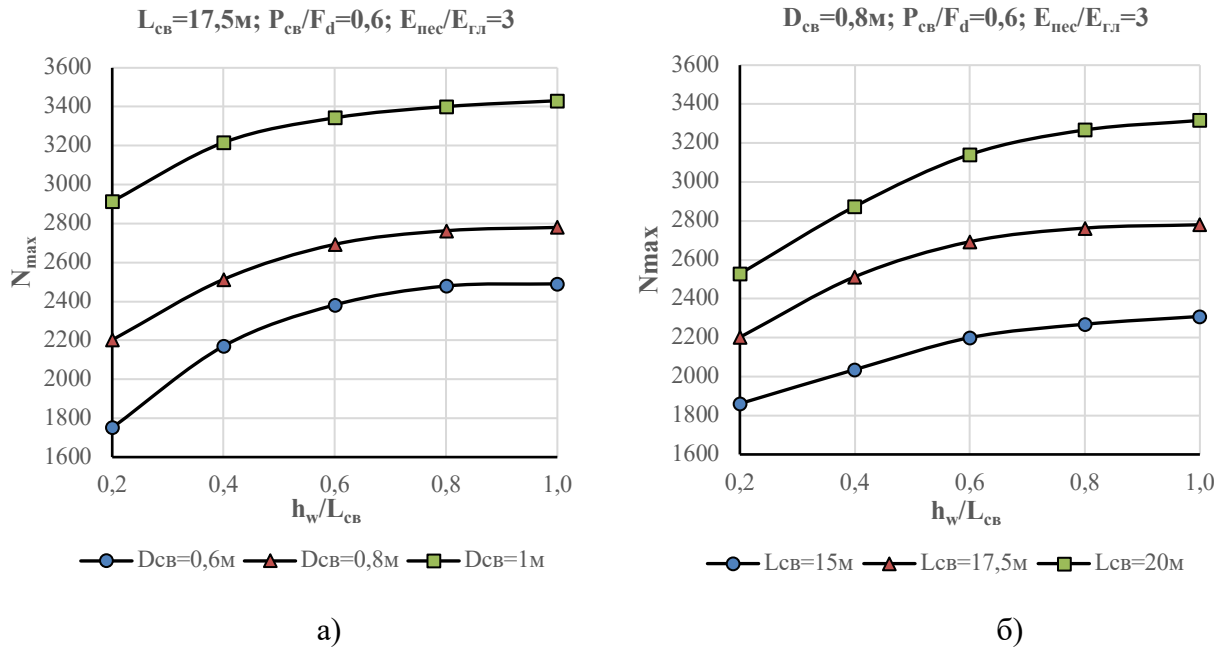


Рисунок 8 – Графики зависимости $N_{max} = f(h_w/L_{cb})$:

а) для различных D_{cb} ; б) для различных L_{cb}

Влияние глубины понижения уровня подземных вод h_w/L_{cb} на нагрузку, передающуюся через нижний конец свай N_L

На Рисунке 9 приведены графики зависимости усилий, передаваемые на грунт через нижние концы свай N_L от глубины понижения уровня подземных вод для различных длин L_{cb} и диаметров свай D_{cb} и отношений P_{cb}/F_d и $E_{пес}/E_{гл}$.

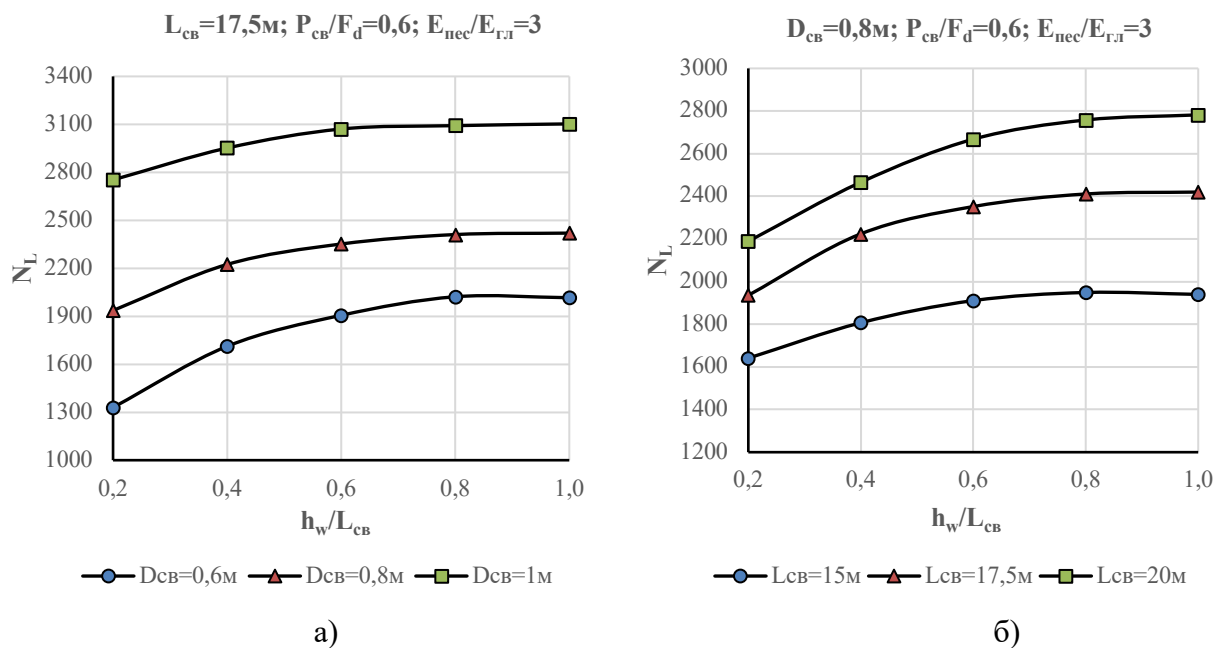


Рисунок 9 – Графики зависимости $N_L = f(h_w/L_{cb})$:

а) для различных D_{cb} ; б) для различных L_{cb}

Графики показывают, что нагрузка на нижний конец сваи N_L также, как и максимальное продольное усилие в свае N_{max} , увеличивается с увеличением глубины водопонижения, длины и диаметра сваи, модуля деформации грунта под ее нижним концом и действующей нагрузки.

Приведенные графики показывают, что все из рассмотренных в проведенном исследовании факторов оказывают большее или меньшее влияние на положение НТ, на усилие N_{max} и N_L при водопонижении.

В третьей главе изложены результаты выполненного на основе теории планирования эксперимента статистического анализа степени влияния рассмотренных в Главе 2 факторов на нормализованную глубину расположения «нулевой точки», определяющую глубину развития сил отрицательного трения на боковой поверхности сваи, вызванных оседанием окружающего массива грунта вследствие, в изучаемом случае, понижения уровня подземных вод.

Перечень факторов с указанием их уровней и интервалов варьирования приведен в Таблице 4.

Таблица 4 - Уровни факторов и интервалы их варьирования

Факторы	Уровни факторов		Интервалы варьирования
	-1	+1	
$X_1 - h_w/L_{св}$	0,2	0,8	0,6
$X_2 - D_{св}$	0,6	1	0,4
$X_3 - L_{св}$	15	20	5
$X_4 - P_{св}/F_d$	0,4	0,8	0,4
$X_5 - E_{пес}/E_{гл}$	1	4	3

Статистический анализ выполнен для следующих трех случаев:

- полная 5-ти факторная модель для анализа зависимости глубины расположения «нулевой точки» от 5-ти, рассмотренных в численном эксперименте факторов;
- 4-х факторная модель для анализа зависимости глубины расположения «нулевой точки» от 4-х, рассмотренных в численном эксперименте для ненагруженной сваи факторов (исключен из рассмотрения фактор уровня нагружения сваи) $P_{св}/F_d$;
- пакет 4-х факторных моделей для четырех значений модульного соотношения $E_{пес}/E_{гл}=1,2,3,4$.

Для каждого из рассмотренных случаев получено уравнение регрессии, выражающее зависимость нормализованной глубины расположения «нулевой точки» от учтенных факторов влияния и их сочетаний.

Полный 5-ти факторного анализ:

$$Y = 0,741 + 0,092X_1 - 0,028X_2 - 0,022X_3 - 0,021X_4 + 0,071X_5 + 0,016X_1X_2 - 0,017X_1X_3 \quad (1)$$

Сваи без вертикальной нагрузки:

$$Y = 0,854 + 0,044X_1 - 0,014X_3 + 0,044X_4 \quad (2)$$

Сваи с вертикальной нагрузкой (4-х факторный анализ):

$$\begin{aligned} E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}=1: Y = 0,671 + 0,11X_1 - 0,038X_2 - 0,025X_3 - 0,022X_4 \\ + 0,023X_1X_2 + 0,013X_1X_4 - 0,01X_3X_4 + 0,009X_1X_2X_4 \end{aligned} \quad (3)$$

$$E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}=2: Y = 0,745 + 0,091X_1 - 0,022X_2 - 0,02X_3 - 0,02X_4 \quad (4)$$

$$E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}=3: Y = 0,788 + 0,08X_1 - 0,023X_2 - 0,022X_3 - 0,019X_4 + 0,014X_1X_2 \quad (5)$$

$$E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}=4: Y = 0,813 + 0,074X_1 - 0,017X_2 - 0,019X_3 - 0,021X_4 + 0,011X_1X_2 \quad (6)$$

Коэффициенты уравнения регрессии позволяют оценить силу влияния каждого из факторов на величину отклика, в нашем случае на глубину расположения «нулевой точки». Чем больше численная величина коэффициента, тем больше его влияние, при этом знак «минус» показывает, что с его увеличением величина отклика уменьшается, при знаке «плюс» - возрастает.

Установленная относительная сила влияния факторов на глубину расположения «нулевой точки» для случая полного 5-ти факторного анализа, выраженная в графической форме в виде диаграммы, показана на Рисунке 10.

Диаграмма показывает, что наибольшее влияние на глубину расположения «нулевой точки» оказывает нормализованная глубина водопонижения $h_w/L_{\text{св}}$ и соотношение модулей деформации грунта под нижним концом сваи и вдоль ее ствола $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}$. Диаметр сваи $D_{\text{св}}$, ее длина $L_{\text{св}}$ и уровень нагружения сваи вертикальной нагрузкой оказывают существенно меньшее влияние на глубину расположения «нулевой точки», но, тем не менее, достаточное для их обязательного учета в расчетах. Аналогичные результаты получены и для других расчетных случаев.

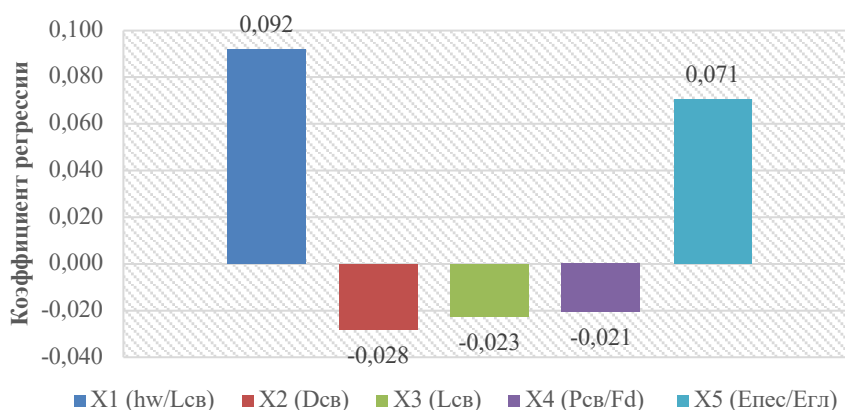


Рисунок 10 - Степень влияния различных факторов и их комбинаций

Аналогичные диаграммы получены и для других рассмотренных случаев.

Четвертая глава посвящена разработке инженерного метода определения несущей способности сваи с учетом отрицательного трения, вызванного понижением уровня подземных вод.

Несущая способность сваи с учетом сил отрицательного трения определяется по известной формуле (7.8) СП 24.13330.2011, которую по предложению Б.И.Далматова можно представить в следующем виде:

$$F_d^* = \gamma_c [\gamma_{cR} RA + \gamma_{cf} u (\sum_{z=z_0}^{z=L_{cb}} f_i h_i - \sum_{z=0}^{z=z_0} f_{i,отр} h_i)] \quad (7)$$

Ключевым моментом, от которого существенным образом зависит точность расчета несущей способности сваи по этой формуле, является правильность определения глубины расположения «нулевой точки» z_0 .

Полученное в результате математического моделирования уравнение регрессии (7) позволяет, в общем случае, определить относительную (нормализованную) глубину расположения нейтральной плоскости (нулевой точки) z_0/L_{cb} в зависимости от пяти факторов: относительной глубины понижения уровня подземных вод h_w/L_{cb} , геометрических размеров сваи (диаметр D_{cb} и длина L_{cb}), уровня нагружения сваи, характеризующегося отношением R_{cb}/F_d , и соотношения модулей деформации грунта под нижним концом сваи и вдоль ее ствола $E_{пес}/E_{гл}$.

Для упрощения расчетов установленные функциональные зависимости, связывающие глубину расположения нейтральной плоскости с указанными факторами, можно представить в графической интерпретации в виде номограмм, что позволит заменить вычислительную работу выполнением простейших геометрических операций и считыванием ответов. Точность расчетов с использованием номограмм примерно та же, что и точность расчетов на логарифмической линейке. В тех случаях, когда требуется большая точность, номограммы можно использовать как вспомогательное вычислительное средство для оценочных расчетов, перебора вариантов или для контроля результатов вычислений с целью обнаружения грубых ошибок.

Наиболее простыми и удобными для применения являются четырехфакторные номограммы, в связи с чем в диссертационной работе был разработан пакет четырехфакторных номограмм для четырех значений $E_{пес}/E_{гл} = 1, 2, 3, 4$, используя которые можно интерполяцией определить относительную глубину расположения нейтральной плоскости z_0/L_{cb} для любого значения отношения $E_{пес}/E_{гл}$ по двум ближайшим найденным по номограммам значениям $E_{пес}/E_{гл}$. Возможность такой интерполяции подтверждается

полученными в результате математического эксперимента графиками $z_0/L_{св} = f(E_{пес}/E_{гл})$ для различных значений $h_w/L_{св}$, $D_{св}$, $L_{св}$ и $P_{св}/F_d$, которые показывают, что во всех рассмотренных случаях между двумя ближайшими точками их можно рассматривать как прямые отрезки, как это делается при определении коэффициента сжимаемости грунта по результатам компрессионных испытаний.

На рисунке 11 представлена типовая 4-х факторная номограмма для определению «нулевой точки» (НТ) в зависимости от относительной глубины водопонижения $h_w/L_{св}$ (X_1), диаметра сваи $D_{св}$ (X_2), длины сваи $L_{св}$ (X_3) и уровня нагружения $P_{св}/F_d$ (X_4) или отношения $E_{пес}/E_{гл}$ (X_4). Последовательность определения НТ по номограмме обозначена стрелочками.

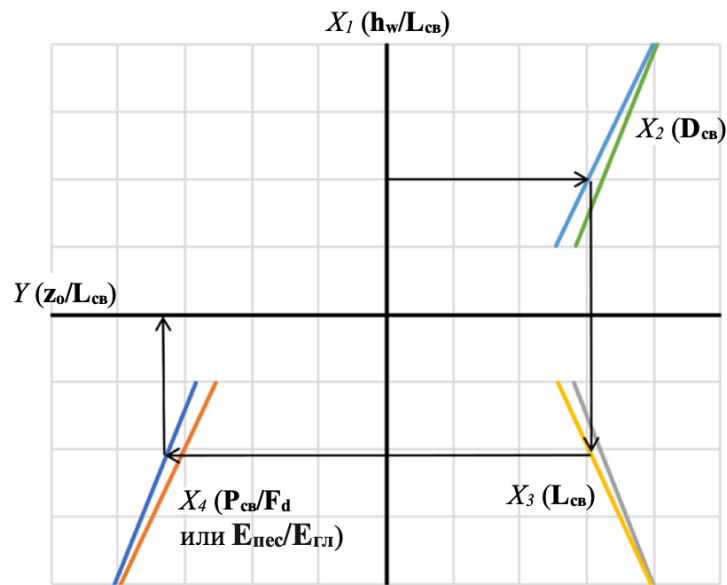


Рисунок 11 – Типовая номограмма для определению (НТ)

Номограмма, представленная на Рисунке 11 носит демонстрационный характер, для практического использования с целью повышения точности расчетов номограммы представлены с более мелкой градацией влияющих факторов.

Номограммы построены для следующих расчетных случаев: ненагруженная свая, пакет из 4-х номограмм для четырех значений модульного соотношения $E_{пес}/E_{гл}=1,2,3,4$.

Для промежуточных значений $(E_{пес}/E_{гл})^*$ нормализованная глубина расположения «нулевой точки» определяется по двум ближайшим найденным по номограммам значениям $z_0/L_{св}$ (Рисунок 12) по формуле (8):

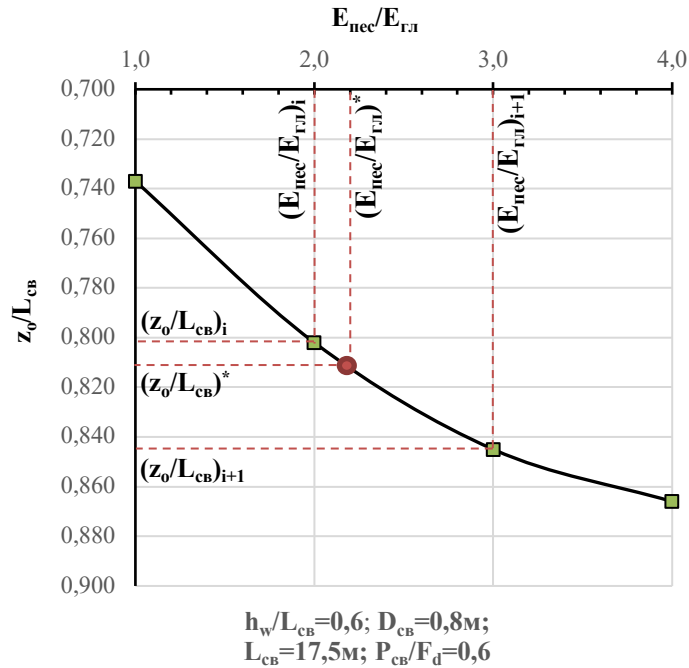


Рисунок 12 – Графики зависимости $z_0/L_{св} = f(E_{пес}/E_{гл})$

$$(E_{пес}/E_{гл})_i < (E_{пес}/E_{гл})^* < (E_{пес}/E_{гл})_{i+1}$$

$$(z_0/L_{св})^* = [(z_0/L_{св})_{i+1} - (z_0/L_{св})_i] \frac{(E_{пес}/E_{гл})^* - (E_{пес}/E_{гл})_i}{(E_{пес}/E_{гл})_{i+1} - (E_{пес}/E_{гл})_i} + (z_0/L_{св})_i \quad (8)$$

где $i=\{1, 2, 3\}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполненные исследования показали, что понижение уровня подземных вод оказывает существенное влияние на работу свай в слабом водонасыщенном глинистом грунте. Это влияние заключается в развитии на боковой поверхности свай сил отрицательного трения, вызванных оседающим грунтом, которые догружают сваю, снижая допускаемую нагрузку на нее от сооружения. Одновременно увеличиваются осевые усилия в свае и нагрузка, передаваемая на грунт через ее нижний конец, что приводит к увеличению осадки свай и может вызвать потерю свай несущей способности.

2. К факторам, влияющим на развитие и распределение отрицательного трения на боковой поверхности свай, относятся глубина водопонижения, длина и диаметр свай, жесткость грунта под ее нижним концом и приложенная нагрузка.

3. Численные исследования динамики развития сил отрицательного трения на боковой поверхности буровой свай и их зависимости от указанных в предыдущем пункте заключения факторов, выполненные с использованием программного комплекса PLAXIS-2D, показали что глубина расположения «нулевой точки», определяющая степень их развития, увеличивается с увеличением глубины водопонижения, соотношения модулей деформации

грунта прорезаемого сваей и под ее нижним концом и уменьшается с увеличением диаметра, длины сваи и приложенной нагрузки.

4. Математико-статистический анализ показал, что при оценке влияния на глубину расположения «нулевой точки» необходимо учитывать все рассмотренные в проведенном эксперименте факторы, однако наиболее значимым из них является глубина водопонижения, остальные из рассмотренных факторов оказывают значительно меньшее влияние, но их учет позволяет повысить точность расчета. Также установлено, что по мере увеличения значения относительной глубины водопонижения влияние грунтовых условий, уровня нагружения сваи, а также ее длины и диаметра на глубину расположения «нулевой точки» существенно снижается.

5. Полученные уравнения полиномиальной регрессии позволяют определить глубину расположения «нулевой точки» в зависимости от рассматриваемых факторов, а также использовать их для построения графических зависимостей, используемых в инженерных расчетах при определении несущей способности буровых свай в слабых глинистых грунтах при развитии сил отрицательного трения на их боковой поверхности, вызванных понижением уровня подземных вод.

6. Представление полученных функциональные зависимости, связывающих глубину расположения «нейтральной плоскости» с исследованными факторами в графической интерпретации в виде номограмм позволяют существенно упростить расчет, заменив вычислительную работу выполнением простейших геометрических операций и считыванием ответов. Точность расчетов с использованием номограмм примерно та же, что и точность расчетов на логарифмической линейке. В тех случаях, когда требуется большая точность расчетов, номограммы можно использовать как вспомогательное вычислительное средство для оценочных расчетов, перебора вариантов или для контроля результатов вычислений с целью обнаружения грубых ошибок.

7. Разработанный пакет номограмм дает проектировщику возможность быстро оценить допускаемую глубину водопонижения и объем их откачек для хозяйственных и промышленных нужд на территориях расположения зданий на свайных фундаментах.

Ценность научной работы заключается в возможности использования результатов проведенных исследований и полученных аналитических зависимостей в практике расчета и проектирования свайных фундаментов на территориях, подверженных водопонижению.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в изучении влияния понижения уровня подземных вод на осадки свайных фундаментов и разработке метода их определения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ
Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий
ВАК:

1. Знаменский, В.В. Влияние процесса водопонижения на развитие сил отрицательного трения по боковой поверхности сваи / В.В. Знаменский, Т.З. Ле // Журнал «Инновации и Инвестиции». - 2022. – №4. - С. 196-200.

2. Знаменский, В.В. К вопросу определения положения нейтральной плоскости при расчете несущей способности сваи с учетом отрицательного трения, вызванного водопонижением / В.В. Знаменский, Т.З. Ле // Журнал «Инновации и Инвестиции». - 2022. – №9. – С. 162-166.

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных
реферативных базах Scopus, Web of Science и др.:

3. Znamenskii, V.V. Influence of lowering groundwater level on the behavior of pile in soft soil / V.V. Znamenskii, O. Hegazy, D. Sayed, T.D. Le // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Т.1030. - №1. - 12096p.