

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Ле Тхюй Зыонг

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

Специальность: 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук, профессор
Знаменский Владимир Валерианович

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. КРАТКИЙ ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	12
1.1 Особенности инженерно-геологических условий г.Ханой	12
1.2 Современное состояние вопроса применения свайных фундаментов на слабых водонасыщенных глинистых грунтах г.Ханой	15
1.3 Отрицательное трение, условия возникновения, влияние на работу свай	18
1.4 Результаты экспериментальных исследований работы свай уплотняющейся грунтовой толще	22
1.5 Аналитические решения	29
Выводы по главе 1	30
ГЛАВА 2: ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ СВАЙ В СЛАБЫХ ГРУНТАХ С УЧЕТОМ РАЗВИТИЯ СИЛ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТРЕНИЯ ВЫЗВАННЫХ ВОДОПОНИЖЕНИЕМ	32
2.1 Постановка задачи, программа исследований	32
2.2 Численная конечно-элементная модель	33
2.3 Верификация конечно-элементной модели	36
2.4 Результаты проведенных исследований	38
2.4.1 Одиночная свая без внешней вертикальной нагрузки	38
2.4.2 Одиночная нагруженная свая	40
2.4.3 Параметрический анализ результатов исследования	42
Выводы по главе 2	48
ГЛАВА 3: МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	50
3.1 Основные положения	50
3.2 Одиночная свая с вертикальной нагрузкой	54

3.2.1 Математическая модель эксперимента.....	54
3.2.2 Оценка параметров модели.....	57
3.3 Одиночная свая без вертикальной нагрузки.....	63
3.3.1 Математическая модель эксперимента.....	63
3.3.2 Оценка параметров модели.....	64
3.4 Одиночная свая с вертикальной нагрузкой (4-х факторный анализ).....	67
3.4.1 Математическая модель эксперимента ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 1$).....	67
3.4.2 Оценка параметров модели ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 1$).....	69
3.4.3 Математическая модель эксперимента (при $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 2$).....	72
3.4.4 Оценка параметров модели ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 2$).....	73
3.4.5 Математическая модель эксперимента ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 3$).....	76
3.4.6 Оценка параметров модели (при $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 3$).....	77
3.4.7 Математическая модель эксперимента при $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 4$	80
3.4.8 Оценка параметров модели ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 4$).....	81
Выводы по главе 3.....	84
ГЛАВА 4: ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАИ С УЧЕТОМ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ТРЕНИЯ, ВЫЗВАННОГО ПОНИЖЕНИЕМ УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД.....	
4.1 Определение несущей способности свай.....	86
4.2 Ключ к номограмме.....	90
4.3 Построение номограмм.....	91
4.3.1 Номограмма для одиночной сваи без вертикальной нагрузки ($P_{\text{св}}/F_d = 0$).....	91
4.3.2 Номограмма для одиночной сваи с вертикальной нагрузкой ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 1$).....	92
4.3.3 Номограмма для одиночной сваи с вертикальной нагрузкой ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 2$).....	93

4.3.4 Номограмма для одиночной сваи с вертикальной нагрузкой ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 3$)	95
4.3.5 Номограмма для одиночной сваи с вертикальной нагрузкой ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 4$)	96
4.4 Примеры определения «нулевой точки» с помощью номограмм	98
4.5 Пример определения несущей способности сваи при известной глубине водопонижения.....	101
Выводы по главе 4.....	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	106
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Результаты расчета зависимости положения «нулевой точки» ($z_0, z_0/L_{\text{св}}$) (без учета нагрузки на голове сваи)	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Результаты расчета максимальных осевых усилий в свае (N_{max}) и нагрузок на ее нижний конец (N_L) (без учета нагрузки на голове сваи). 121	
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Результаты расчета зависимости положения «нулевой точки» ($z_0, z_0/L_{\text{св}}$) (с учетом нагрузки на голове сваи)	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Результаты расчета максимальных осевых усилий в свае (N_{max}) и нагрузок на ее нижний конец (N_L) (с учетом нагрузки на голове сваи).. 125	
ПРИЛОЖЕНИЕ Д - Список публикаций автора по теме диссертационной работы	128

ВВЕДЕНИЕ

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 [136]. Отрицательное трение возникает вследствие оседания окружающей массы грунтов относительно сваи вниз, 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 сваи 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. [2], Далматов Б.И. [11, 12], Знаменский В.В. [18-21, 61, 144, 145], Лапшин Ф.К. [12], Пилягин А.В. [11, 35], Тер-Мартirosян З.Г. [54-57], Фадеев А.Б. [62], Buisson M. [77], Crawford C.B. [84], Endo M. [86], Fellenius B.H. [87-93], Sayed D.A. [145], Zeevaert L. [142], Maugeri [117], Leung [108], Lam S. Y [100-102], Lv Y. R. [111-113], Lee C.J. [105, 106], Chen R.P. [80], Sujawat S., Giridhar Rajesh B. [132], Terzaghi K. [136], Во Фан, Ле Фьонг, Во Нгок Ха [8], Hegazy O.M. [144, 145], Фи Х.Т. [63-66]), 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 с достаточной для практических целей точностью выполнять расчеты несущей способности и осадки свай. Что касается учета сил отрицательного трения, вызванных водопонижением, то этот вопрос рассматривался в работах C.J. Lee and C.R. Chen [104] и N. Kiprotich [122], 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 изменения 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 оседающего 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 достижении следующих результатов:

- 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, характеризуемое 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 свай, 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.

ГЛАВА 1. КРАТКИЙ ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В настоящей главе наряду с опубликованными материалами, непосредственно касающимися темы диссертационной работы, представлены также некоторые сведения об особенностях инженерно-геологических условий г. Ханой и связанных с ними проблемах городского строительства на сваях. Это сделано с целью еще раз подчеркнуть важность и актуальность рассматриваемой в диссертации тематики.

1.1 Особенности инженерно-геологических условий г. Ханой

Город Ханой расположен в рифтовой зоне реки Красная за равниной Вакбо на севере Вьетнама. Ханой граничит с провинциями Винь-фук на севере, Ха-нам на западе, Хай-зыонг на юге и Бак-нинь на востоке. С 2008 года площадь административного образования Ханой составляет 3344,7 кв. км. В него входят 10 городских районов и 18 сельских. В настоящее время численность населения Ханоя составляет 7 млн человек.

Территория Ханоя почти ровная, слабонаклоненная в юго-восточном направлении. Уклон поверхности земли в среднем составляет 15-20см на 1км. Абсолютные отметки поверхности изменяются от 4 до 11м. Город защищают от наводнениям дамбы, верхняя отметка которых составляет 14-15м.

Характерной особенностью геологического строения территории города является наличие мощных толщ слабых грунтов, карта распространения которых, составленная Х.Т. Фи в 2014 г. [63], показана на Рисунке 1.1.

В верхней части разреза четвертичных отложений на обозначенных территориях встречаются слабые грунты, к которым относятся аллювиально-озерно-болотные отложения свиты Винь-фук, озерно-болотные и аллювиально-болотно-морские отложения свиты Хайхынг и аллювиально-озерно-болотные отложения свиты Тхай-бинь (см. Рисунок 1.2). Различные по возрасту, генезису и составу указанные грунты обладают рядом присущих им негативных свойств, к которым, в первую очередь, относятся:

- малая степень уплотнения, высокая влажность или полное водонасыщение;

- большая сжимаемость;
- низкая сопротивляемость сдвигу, возрастающая по мере уплотнения;
- тиксотропия (падение прочности при динамическом воздействии);
- изменение свойств при атмосферных, механических и иных воздействиях.

Использование обладающих такими свойствами грунтов в естественном состоянии в качестве оснований проектируемых зданий и сооружений на обычных фундаментах без проведения специальных мероприятий по предварительному улучшению их свойств практически невозможно. В настоящее время строители и технологи обладают большим набором средств для осуществления таких мероприятий, однако стоимость их выполнения при большой толще слабых грунтов очень высока, что существенно удорожает строительство и способствует поиску других решений, направленных как на разработку новых методов искусственного улучшения строительных свойств слабых грунтов, так и на массовое применение свай.

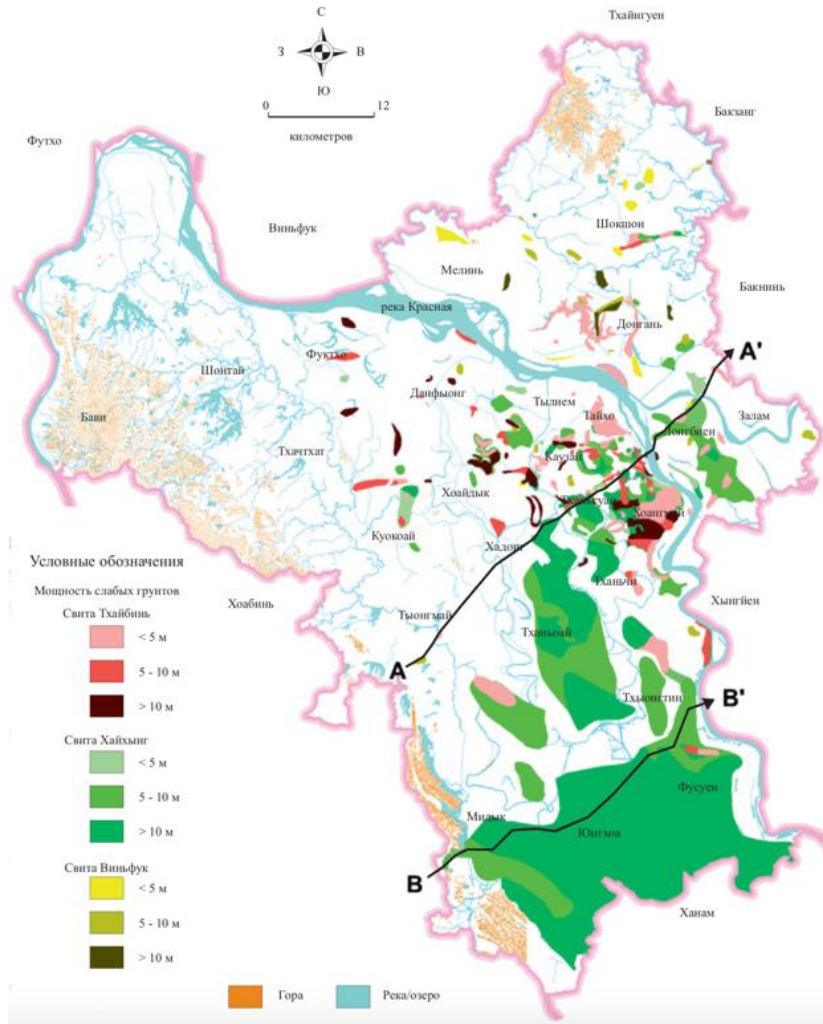


Рисунок 1.1 - Карта распространения и мощности слабых водонасыщенных грунтов на территории г.Ханоя (Фи Х.Т. [62])

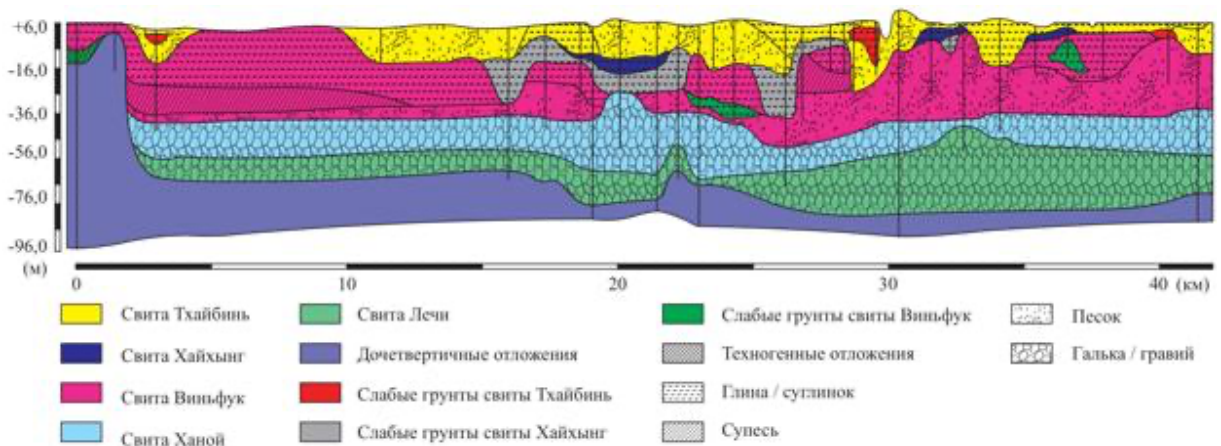


Рисунок 1.2 – Распределение слабых грунтов на территории Ханоя в инженерно-геологическом разрезе AA' (Фи Х.Т. [63])

1.2 Современное состояние вопроса применения свайных фундаментов на слабых водонасыщенных глинистых грунтах г.Ханой

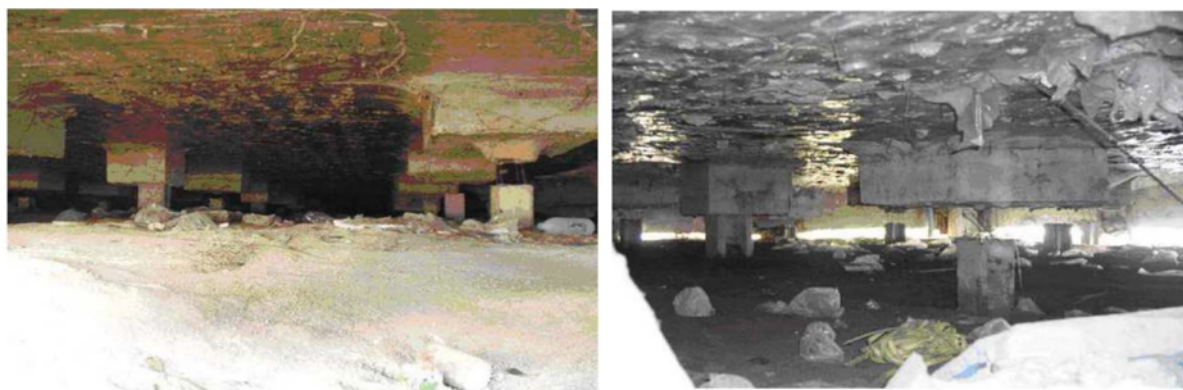
В связи с нехваткой площадей под интенсивное развитие города в последние десятилетия под строительство различных зданий и сооружений пришлось использовать площадки со слабыми грунтами, данные о широком распространении которых приведены в предыдущем параграфе. Ранее на этих площадях возводились малоэтажные постройки, передающие на основание небольшие нагрузки. Основание либо улучшалось одним из существующих методов, либо заменялось. По мере у роста нагрузок на основание вследствие увеличения этажности зданий стали применять фундаменты на сваях, которыми, как правило, прорезали толщу слабых грунтов и передавали нагрузку на более прочные грунты под нижними концами свай. На этом этапе в основном применялись забивные сваи длиной до 12,0 м, однако ресурс таких свай по несущей способности был выработан по мере роста этажности зданий и передаваемых на основание нагрузок и тогда перешли на набивные сваи, длина которых позволяла пройти практически любую толщу слабых грунтов вплоть до 100 м и передавать на основание значительно большие нагрузки (до 5000 т).

Расчеты проектирование свайных фундаментов как на забивных, так и на буровых сваях выполнялся по строительным нормам Вьетнама (TCVN 10304:2014) [134], являющихся аналогом Российских норм СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты [52], что позволило с успехом осваивать под новое, в том числе высотное строительство, обширные территории, характеризующиеся распространением больших толщ слабых грунтов.

Одной из проблем, проявившихся при строительстве на сваях в слабых водонасыщенных грунтах, явились дополнительные осадки фундаментов, вызванные догрузением свай оседающим в результате откачек воды грунтом. Откачки пресных подземных вод на вновь освоенных территориях осуществлялись под нужды городского хозяйства и по запросу многочисленных предприятий по товарному разведению пресноводных рыб. Дополнительные осадки фундаментов

при этом во многих случаях превышали нормативные значения, а в некоторых из них приводили к разрушению фундаментов.

Примеры разрушения свайных фундаментов, вызванного оседающей в результате откачек воды толщи слабого грунта в Ханое (Вьетнам) и в Бангкоке (Таиланд), показаны на Рисунке 1.3. В обоих случаях осадка свай, вызванная понижением уровня подземных вод, привела к разрыву арматуры и их отрыву от ростверка.



а)

б)



в)

Рисунок 1.3 – Реальные разрушения свайного фундамента, вызванного водопонижением: а) Бангкоке (Ле Фьонг [103]); в) Ханой (Нгуен В.В. [124])

На Рисунке 1.4 приведена карта расположения станций по откачке пресной воды из подземных горизонтов, а на Рисунке 1.5 – карта зонирования ожидаемых при этом оседание поверхности грунта.

Данные, приведенные на картах, позволяют оценить масштабы существующей проблемы и подтверждают необходимость ее детального изучения и решения.

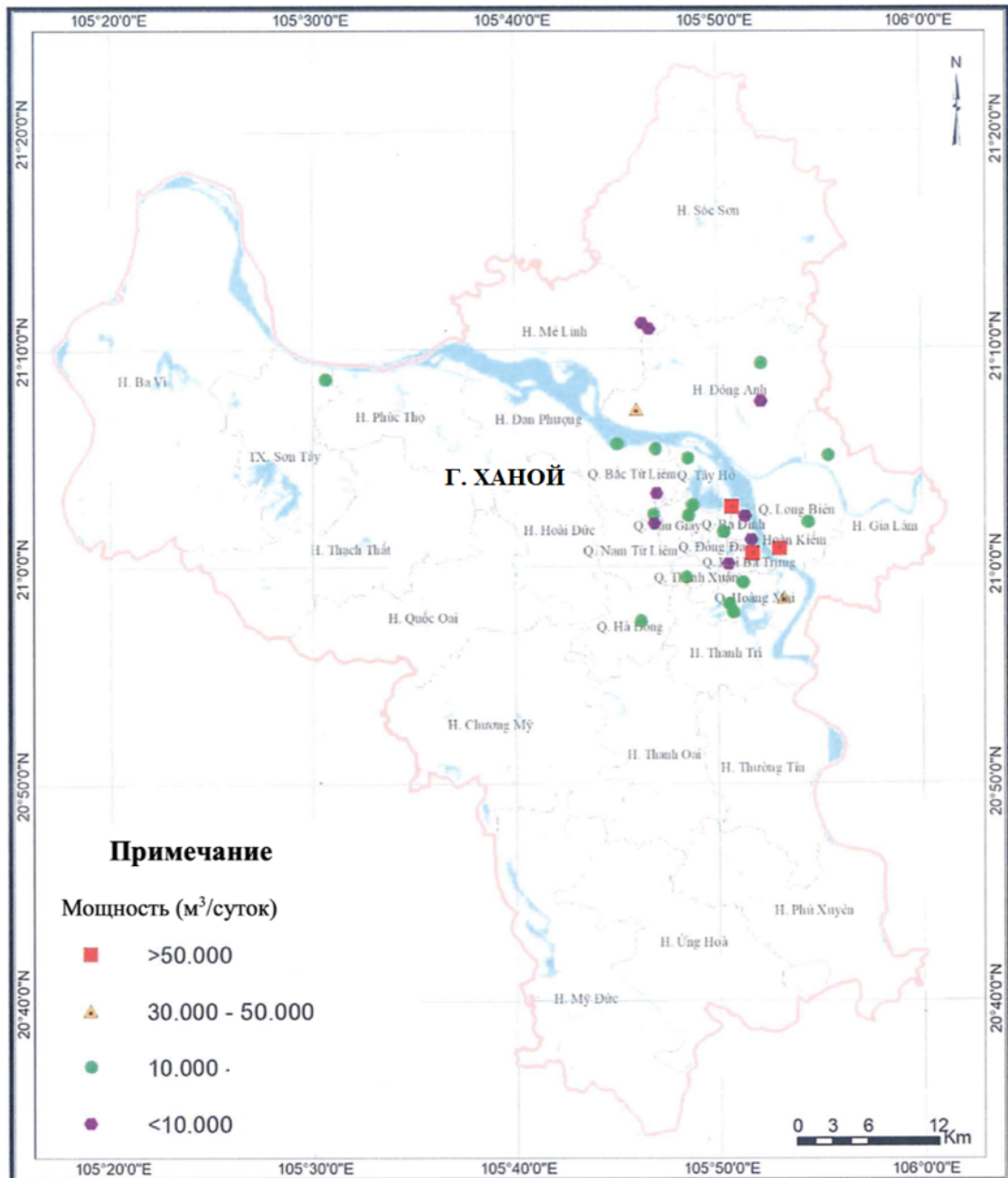


Рисунок 1.4 – Карта расположения станций по откачке воды в городе Ханой (Нгуен В.В.[124])

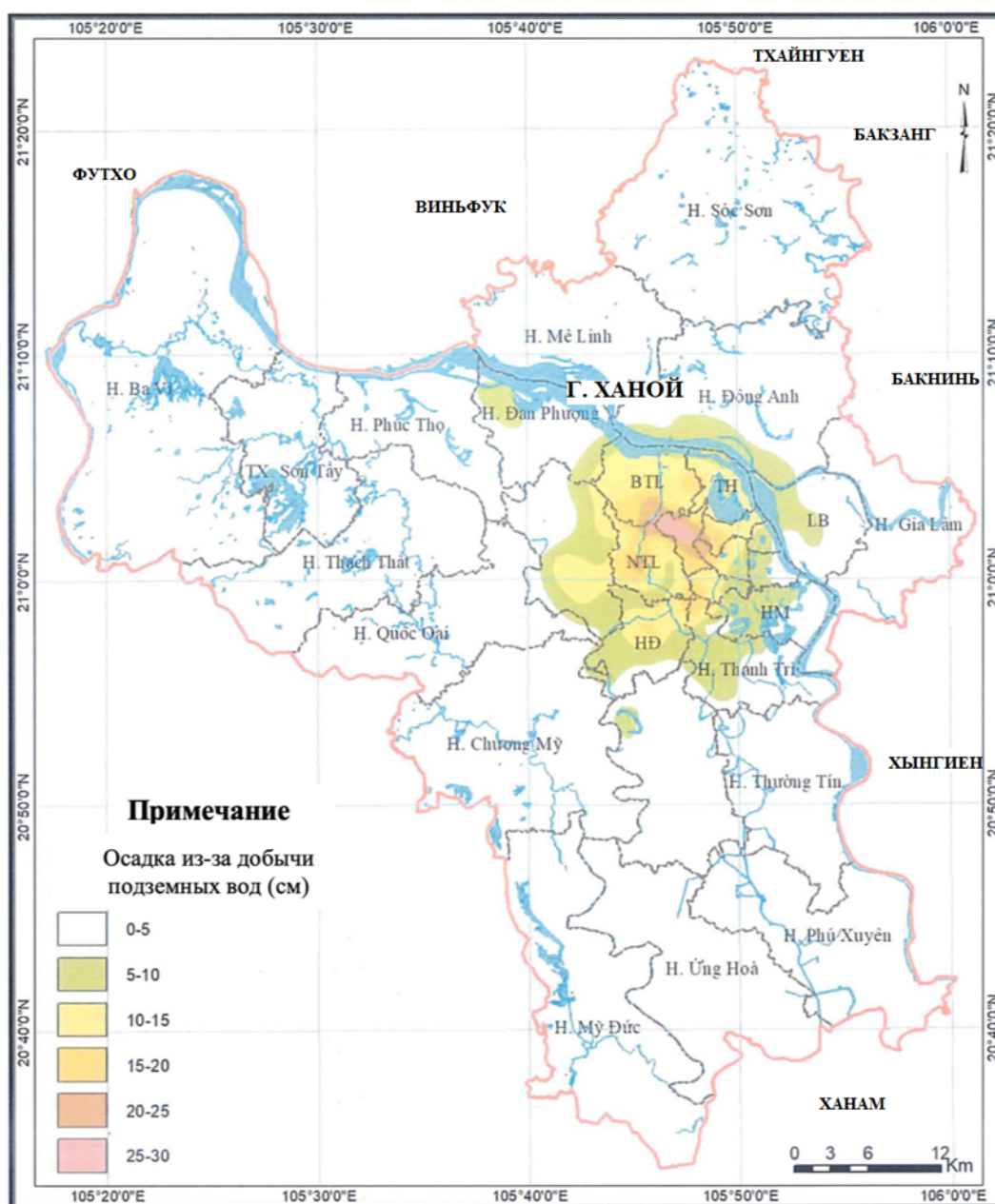


Рисунок 1.5 – Проседание поверхности грунта, вызванное откачкой воды в городе Ханой (Нгуен В.В.[124])

1.3 Отрицательное трение, условия возникновения, влияние на работу свай

Причиной возникновения отрицательного трения является оседание грунта относительно свай, в результате чего на ее боковой поверхности развиваются догружающие сваю силы трение. Причинами оседания грунта в условиях современной городской застройки при наличии сравнительно слабых грунтов могут являться:

- планировка территории путем подсыпки;

- нагружение поверхности грунта в складских помещениях и хранилищах длительно действующими полезными нагрузками (отсыпки зерна, угля, расположение оборудования);

- незавершившаяся после возведения здания консолидация грунта;

- самоуплотнение намывных и насыпных грунтов;

- замачивание просадочных грунтов;

- оттаивание мерзлых вспученных грунтов;

- снятие взвешивающего действия воды при ее откачке для хозяйственных нужд или осушении территории, что является предметом изучения в настоящей диссертационной работе.

Возможны и другие причины, связанные, например, с еще мало изученными, естественными процессами, приводящими к постепенному уплотнению молодых слабых грунтов, или устройством в непосредственной близости от существующих свайных фундаментов фундаментов мелкого заложения вновь возводимого здания.

Мобилизация сил отрицательного трения на боковой поверхности свай происходит следующим образом (Рисунок 1.6). Осадки слоев грунта S_{zp} , вызванные пригрузкой, водопонижением или иными причинами, и вертикальные перемещения свай $S_{св}$, слагающиеся из осадки острия S_{oc} и сжатия ствола свай $S_{с.св}$, на разных глубинах неодинаковы. Если на верхнем участке $S_{св}$ превысит S_{zp} , на этом участке возникнет отрицательное трение $f_{отр.z}$, которое разовьется до глубины z_0 , на которой $S_{zp} = S_{св}$, т.е. смещение грунта относительно свай отсутствует, следовательно боковое трение равно нулю. На эпюре бокового трения здесь имеем нулевую точку, на что еще 75 лет назад впервые обратил внимание К. Terzaghi [136] (см. М. Vuisson и др. [77]), назвав ее нейтральной точкой. Ниже «нулевой точки» (НТ), где $S_{zp} < S_{св}$, действует положительное трение $f_{пол.z}$, поддерживающее сваю, выше – отрицательное трение $f_{отр.z}$, догружающее ее.

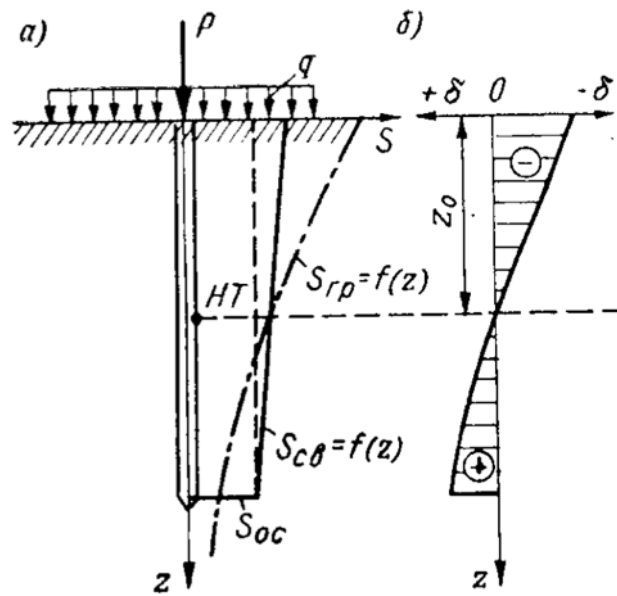


Рисунок 1.6 – Совместная работа одиночной вертикальной сваи и оседающего грунта: а – эпюры осадок грунта $S_{гр}$ и вертикальных перемещений сваи $S_{св}$; б – эпюры относительных перемещений δ сваи и грунта

(Далматов Б.И. [12])

Уравнение равновесия сил, действующих на сваю после завершения осадки, можно записать как:

$$P + u \int_0^{z_0} f_{отр.z} dz = P_{oc} + u \int_{z_0}^l f_{пол.z} dz \quad (1.1)$$

где u и l – периметр поперечного сечения сваи и ее длина.

Отрицательное трение проявляется при независимой от осадок свай осадке грунтовой толщи. Так известен случай, когда куст из свай длиной 14,0 м еще до передачи на него вертикальной нагрузки получил осадку, обусловленную только оседающим под действие насыпи высотой 1,0 м грунте (Б.И. Далматов, А.В. Пилягин, [11]).

С.В. Crawford [83] изучал особенности загрузки висячей сваи оседающим грунтом. Тензометрическая свая была погружена в слабый глинистый грунт на глубину 49,0 м. Свая не воспринимала вертикальную нагрузку, оседание грунта вокруг сваи было вызвано весом 9-ти метровой насыпи. На Рисунке 1.7 показаны графики изменения с глубиной и во времени продольных (осевых) усилий в свае. Как видно из рисунка, продольные усилия в свае N_z увеличиваются до глубины 15-

18 м, что свидетельствует о развитии отрицательного трения по боковой поверхности сваи до этой глубины.

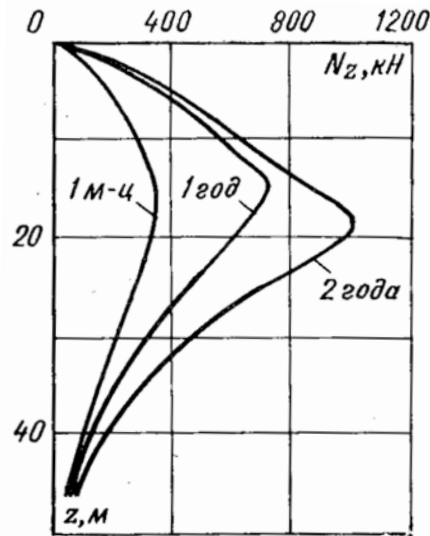


Рисунок 1.7 – Распределение продольных усилий N по длине стальной тензосваи после отсыпки грунтовой насыпи (Далматов Б.И. [12])

На Рисунке 1.8 показаны графики развития во времени продольных усилий в сечениях стальной трубчатой висячей тензосваи с периметром поперечного сечения 1,92 м, нагруженной оседающим грунтом (M.Endo и др. [85]). Свая была погружена в толщу слабых аллювиальных глинистых грунтов на глубину 43,0 м и опиралась на кровлю делювиальных песков. Глубина развития сил отрицательного трения, зафиксированная в этих опытах, составляла примерно 0,6 длины сваи.

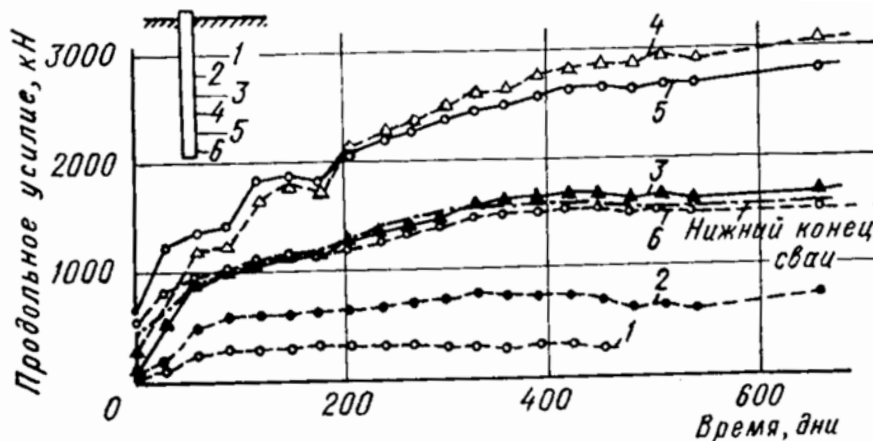


Рисунок 1.8 – Развитие во времени продольных усилий в сечениях стальной трубчатой тензосваи, нагруженной оседающим грунтом (Далматов Б.И. [12])

1.4 Результаты экспериментальных исследований работы свай уплотняющейся грунтовой толще

Экспериментальным исследованиям работы свай в уплотняющейся грунтовой толще посвящено много работ, в том числе и зарубежных. В настоящем параграфе приведены результаты некоторых из них, по которым в публикациях представлена наиболее полная информация.

В работе С.Л. Lee and С.С. Chen [104] приводятся результаты экспериментальных исследований развития сил отрицательного трения по боковой поверхности одиночной сваи, вызванных оседающим после водопонижения грунтом.

Изучение, было проведено на геотехнической центрифуге. Консолидометр, в который помещали грунт и модель сваи, состоял из испытательного сосуда с тремя уплотнительными кольцами высотой 100, 200 и 300 мм, удлинительного кольца, загрузочной рамы и жесткой загрузочной пластины с цилиндром. Испытательный сосуд имел внутренний размер 400 мм и высоту 600 мм (Рисунок 1.9).

Укладка грунта в консолидометр осуществлялась следующим образом. Сначала на дно консолидометра укладывался слой дренажного песка толщиной 10 мм, после чего в него закладывался датчик давления поровой воды (РРЕ-5). Давление поровой воды, измеренное РРТ-5, использовалось для контроля высоты воды в грунте в ходе испытаний. Затем глинистый грунт в виде суспензии заливался в испытательный сосуд в четыре слоя, каждый из которых подвергался вакууму в течение двух часов. После сборки силовой рамы к грунту прикладывалось усилие уплотнения 10 кПа фиксировалась его осадка во времени до стабилизации процесса уплотнения. Далее этот процесс повторялся при нагрузках 20, 40 и 80 кПа, а затем прикладывалась нагрузка, составляющая 117 кПа. Процесс консолидации при каждой нагрузке занимал от 4 до 5 дней. В общем на подготовку одного опыта требовалось около 20 дней.

Когда средняя степень уплотнения в грунтовом слое достигала 90%, модель считалась готовой к изменению уровня подземных вод. Давление воздуха в

воздушно-водяном резервуаре было снижено по данным датчика РРТ-5 на 58,8 кПа, что снизило уровень воды в модели на 120 мм. Это соответствовало падению уровня воды в прототипе на 6 м.

Модельная свая была изготовлена из стальной трубы диаметром 20 мм, длиной 450 мм и состояла из 5 сегментов корпуса и одного сегмента наконечника, оснащенных миниатюрными тензодатчиками для измерения осевых усилий в различных сечениях сваи.

Нижний конец сваи был снабжен резиновым наконечником. Толщина резины (2 мм и 4 мм) варьировалась для моделирования пластов различной жесткости с целью оценки влияния жесткости грунта подстилающего слоя на распределение осевых сил в свае и высоту нейтральной плоскости.

Установка модельной сваи в грунт осуществлялась с помощью направляющей рамы.

Схема проведения испытания на центрифуге показана на Рисунке 1.10.

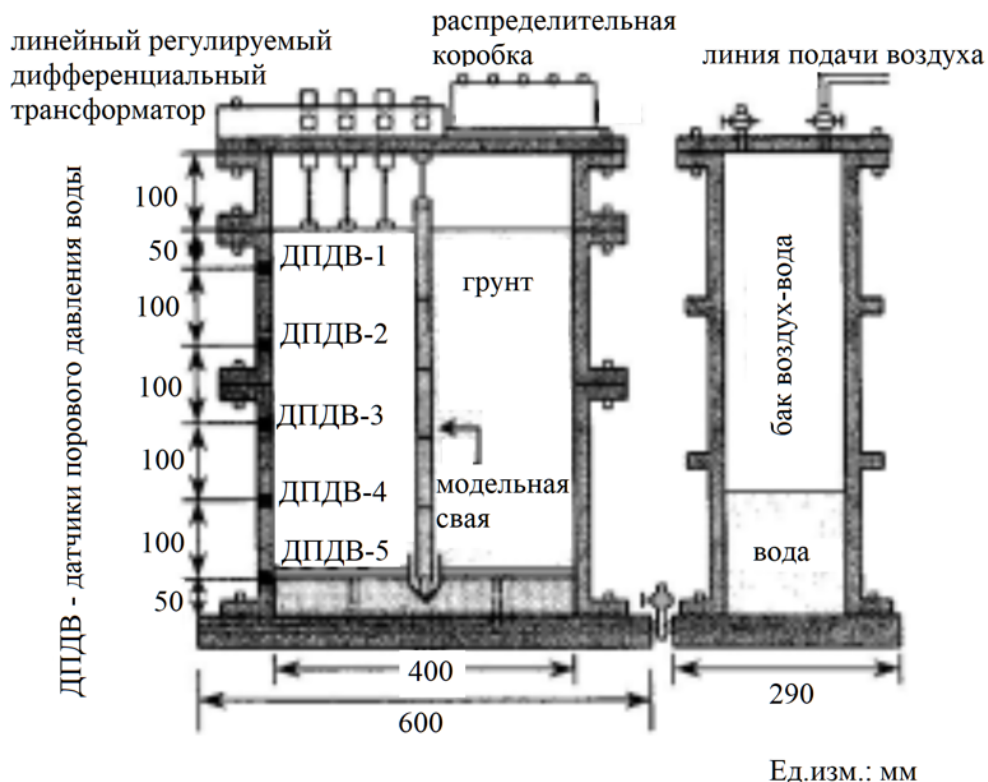


Рисунок 1.9 – Консолидометр (С.С. Lee and С.С. Chen [104])

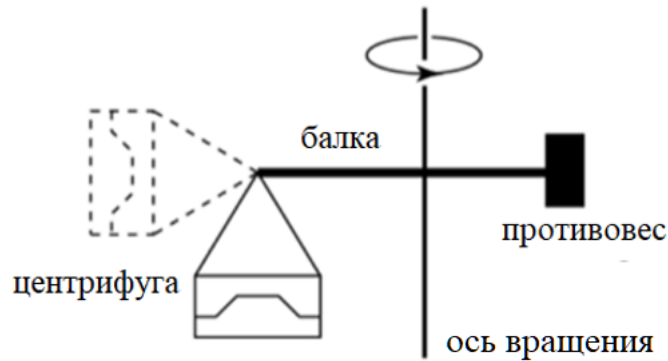


Рисунок 1.10 - Схема проведения испытания на центрифуге (Muir Wood, [121])

При обработке результатов проведенных испытаний удельное сопротивление грунта на поверхности сваи f_s принималось пропорциональным эффективному напряжению в грунте вокруг сваи σ'_v :

$$f_s = \beta \sigma'_v \quad (1.2)$$

$$\beta = k \cdot \tan \delta \quad (1.3)$$

$$k = (1 - \sin \varphi) \sqrt{OCR} \quad (1.4)$$

где δ – угол трения грунта о сваю; φ - угол трения грунта; k - коэффициент бокового давления грунта; OCR - коэффициент переуплотнения.

В проведенных опытах $\delta = 32^\circ$, $\varphi = 25,8^\circ$; β принимался равным 0,2..0,3.

Приращение осевой силы dN на длине сваи $dL_{св}$ рассчитывалось следующим образом (Рисунок 1.11):

$$dN = f_s \pi D_{св} dL_{св} + dW = k \cdot \tan \delta \cdot \sigma'_v \pi D_{св} dL_{св} + dW \quad (1.5)$$

где dW – вес элемента сваи;

Отсюда осевую силу N_z в сечении свае на глубине z ($z < z_0$) где z_0 – глубина нейтральной плоскости, можно записать как:

$$N_z = \pi D_{св} \int_0^z k \cdot \tan \delta \cdot \sigma'_v dL_{св} + \int_0^z dW \quad (1.6)$$

а на глубине z ($z_0 < z < L_{св}$)

$$N_z = \pi D_{св} \int_0^{z_0} k \cdot \tan \delta \cdot \sigma'_v dL_{св} + \int_0^z dW - \pi D_{св} \int_{z_0}^z k \cdot \tan \delta \cdot \sigma'_v dL_{св} \quad (1.7)$$

где $dL_{св}$ - длина элемента сваи; $L_{св}$ – длина сваи.

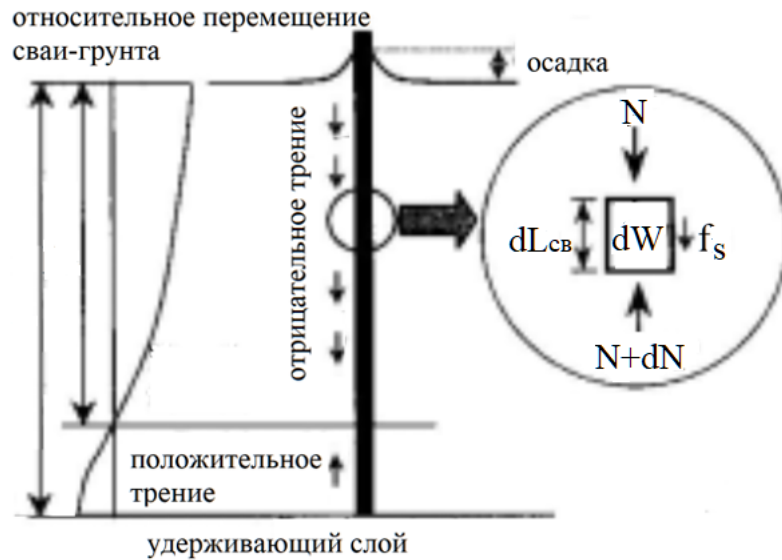


Рисунок 1.11 - Мобилизация отрицательного трения на свае (С.С. Lee and С.С. Chen [104])

Максимальная осевая сила в сечении сваи N_{\max} действует на глубине расположения нейтральной плоскости. При смещении нейтральной плоскости вниз, осевая сила в сечении сваи увеличивается (Рисунок 1.12).

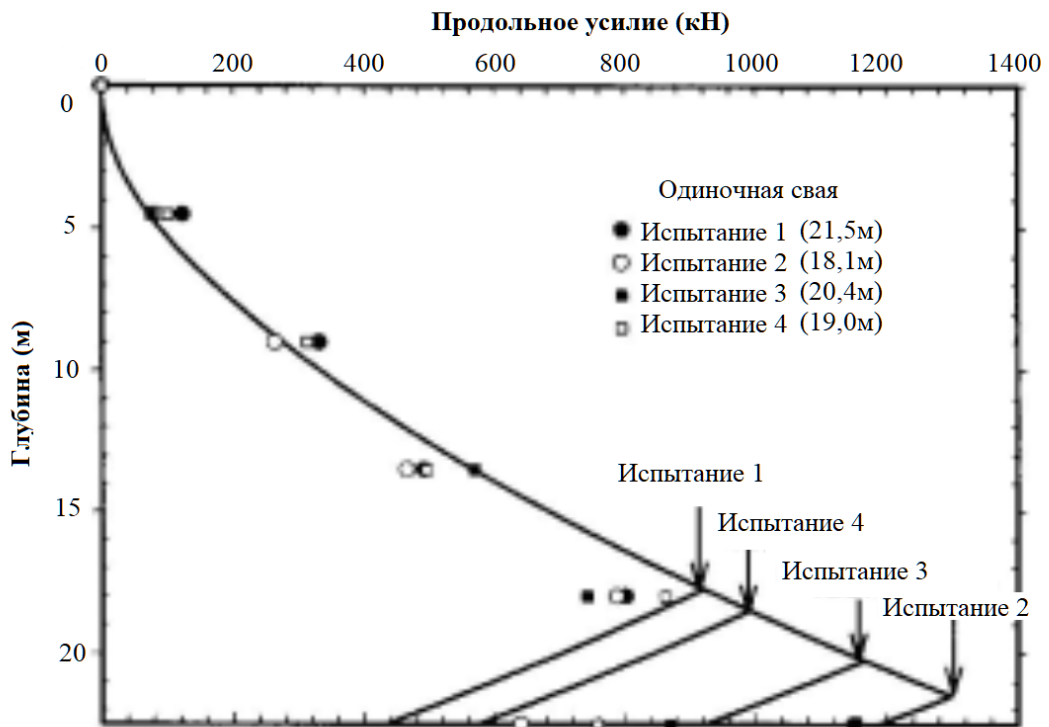


Рисунок 1.12 - Изменение осевого усилия в свае по мере понижения уровня воды (С.С. Lee and С.С. Chen [104])

Проведенные опыты на отдельном конкретном примере подтвердили правильность гипотезы о причинах мобилизации и закономерности распределения сил отрицательного трения в оседающем грунте.

Nelson K. [122] выполнил моделирование описанного выше испытания, проведенного С.С. Lee and С.С. Chen на центрифуге. Численное моделирование выполняется с помощью ПК PLAXIS-2D и встроенной конститутивной модели мягкого грунта, расчетная схема показана на Рисунке 1.13.

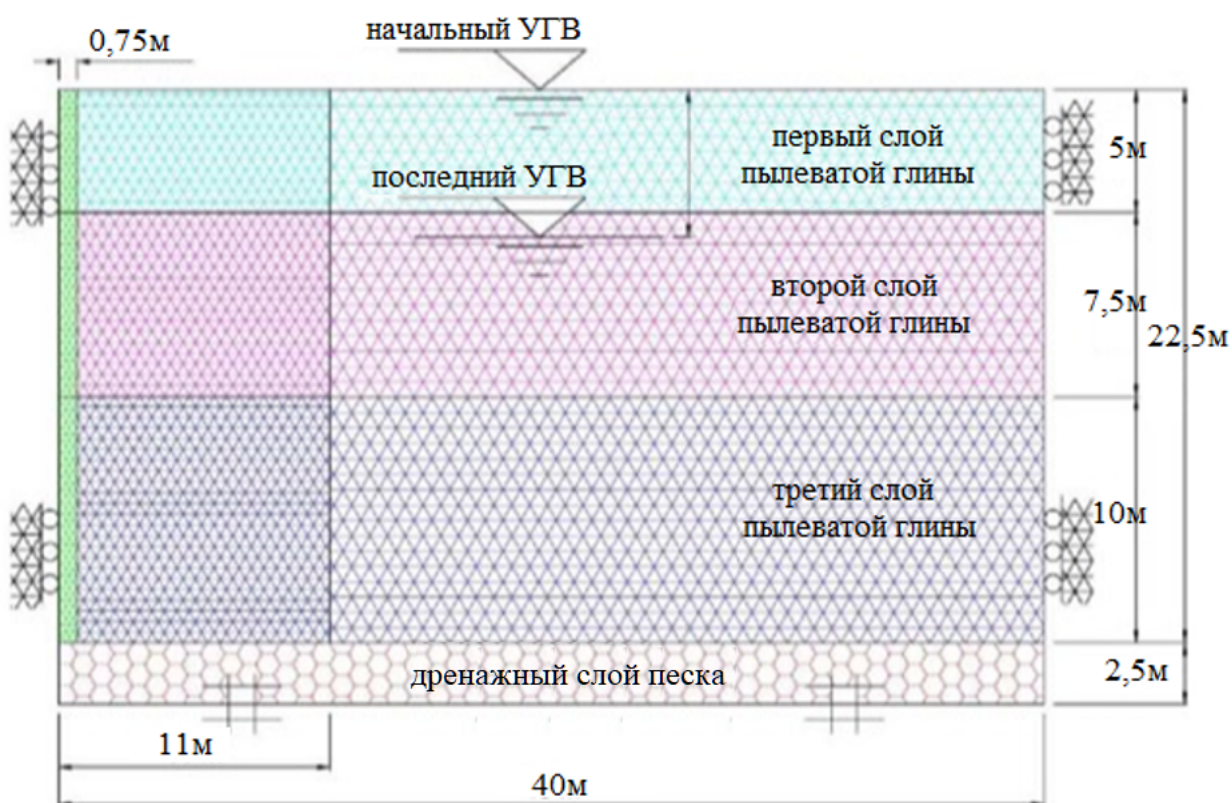


Рисунок 1.13 – Расчетная схема (Nelson K. [122])

Проведенное численное моделирование мобилизации сил отрицательного трения из-за понижения уровня грунтовых вод показало следующее:

- осевые силы в сваи превысили измеренные на 17%;
- осадка грунта вокруг сваи оказалась заниженной на 35%;
- диаметр сваи и жесткость ее материала по результатам моделирования мало отразились на силах отрицательного трения;

- существенное влияние на величину отрицательных сил трения, возникающих на границе свая-грунт, оказывает параметр R_{int} (коэффициент трения).

Разница в замеренных и полученных расчетом значениях осадок поверхности грунта и головы сваи и ее изменение в процессе консолидации грунта показаны на графиках на Рисунке 1.14.

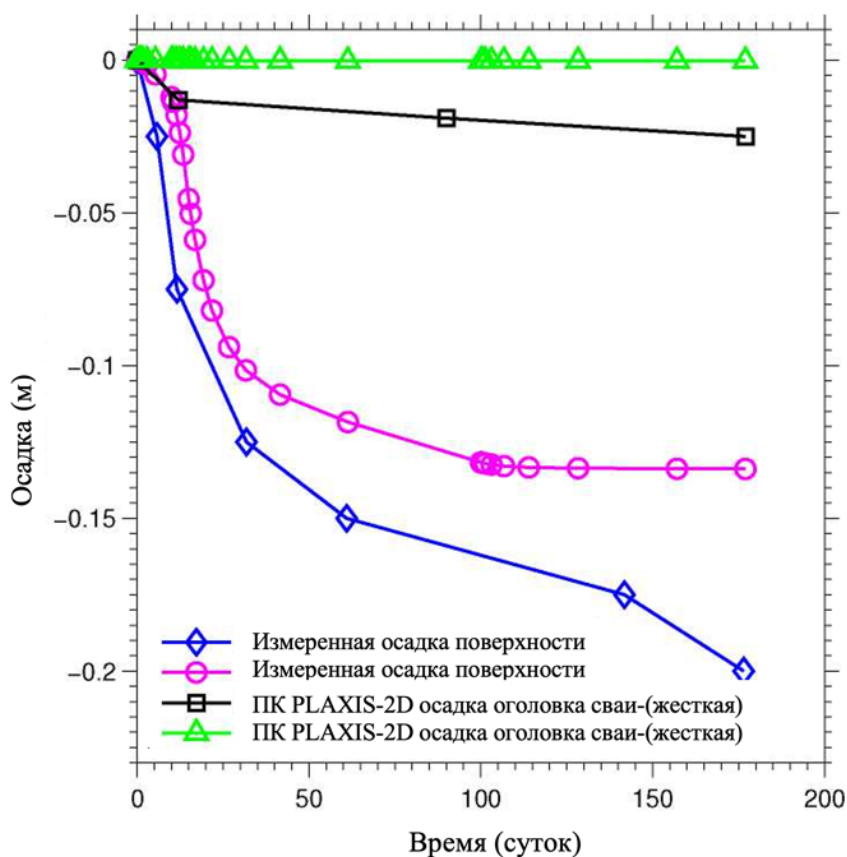


Рисунок 1.14 – Графики изменения осадки поверхности грунта и сваи по мере консолидации грунта (Nelson K. [122])

В своей работе Sujawat Singh Rituraj & B. Giridhar Rajesh [132] рассмотрели вопросы влияния отрицательного трения на несущую способность одиночных свай и свайных групп. Показана возможность снижения сил отрицательного трения за счет покрытия боковых поверхностей свай битумом или каким-либо другим составом, приводящим к снижению поверхностного трения.

Во Ф., Ле Ф. и Во Н.Х. [8] проанализировали зависимость развития отрицательного трения на боковой поверхности сваи от степени консолидации

грунта. Показано, что отрицательное трение развивается в зависимости от процесса консолидации основания или времени использования сваи. Показано, что значение сил отрицательного трения на боковой поверхности одиночной сваи быстро растет, когда степень консолидации грунтов не превышает 60%, и почти не изменяется, когда она составляет около 85%. Когда степень консолидации грунта составляет 100%, увеличение отрицательного трения приводит к увеличению продольного усилия в свае до максимального значения, и может быть больше чем ее несущая способность. Этот вывод хорошо коррелирует с результатами, полученными другими исследователями, в частности С.Л. Ли и С.С. Чен [104].

Нгуен Хонг Синь [30] провел исследования развития сил отрицательного трения на боковой поверхности одиночной сваи в сильносжимаемых неполностью водонасыщенных глинистых грунтах с учетом их нелинейного деформирования. Им была разработана методика расчета сил отрицательного трения по боковой поверхности сваи на основе прогноза НДС массива грунта в случае осесимметричной задачи, для чего было получено решение осесимметричной задачи консолидации слабых, неполностью водонасыщенных глинистых грунтов с учетом их нелинейной деформируемости и проницаемости на основе численной модели [30].

На основе полученных решений выполнен расчет отрицательного трения на боковой поверхности сваи-стойки и висячей сваи и дана сравнительная оценка с результатами крупномасштабных полевых экспериментов, выполненных другими авторами. Показано существенное влияние на характер развития отрицательного трения в пространстве и во времени учета нелинейной деформируемости и проницаемости глинистого грунта [30].

Анализ результатов расчета (свая диаметром 1 м, длиной 10 м) по разработанной методике показал, что отрицательное трение достигает больших значений в течении нескольких десятков лет, а нейтральная точка смещается вниз примерно с той же скоростью [30].

Методика может представлять интерес для специалистов, занимающихся вопросами изменения НДС консолидирующих грунтов.

1.5 Аналитические решения

Параллельно с экспериментальными исследованиями возникновения и развития отрицательного трения по боковым поверхностям свай в оседающем по той или иной причине грунте был ряд попыток получить аналитическое решение этой задачи. Так в предыдущем параграфе было приведено решение С.Л. Lee and С.Р. Chen [104] по определению максимального продольного усилия, развивающегося в свае при оседании грунта, вызванного пригрузкой его поверхности, но наиболее полное решение, включающее в себя расчет одиночной сваи по двум предельным состояниям в условиях оседающей грунтовой толщи, было предложено Ю.В. Россихиным [43]. Решение было получено на базе классических решений К.Е. Егорова [16] и Mindlin R.D. [111].

Полученные Ю.В. Россихиным решения представляют научный интерес, но в силу своих сложностей и ряда вынужденных допущений, влияющих на точность получаемых расчетом результатов, на при проектирования практически не использовались.

Здесь примечательно замечание Б.И. Далматова [12], который принимал непосредственное участие в разработке этого решения. Б.И. Далматов говорил, что «большое число факторов, влияющих на развитие отрицательного трения, а также характерная для слабых грунтов значительная неоднородность их сложения не благоприятствуют разработке «строгих решений», доступных для практического использования. Поэтому попытки получить так называемые «строгие решения» не привели к желаемым результатам».

Это подтверждают и результаты исследований Nelson K. [122], который показал, что аналитические решения могут завышать осевые усилия в свае на 76%.

В связи с этим для практических расчетов Б.И. Далматов предложил формулу для определения несущей способности F_d сваи, окруженной оседающим грунтом:

- для висячей сваи

$$F_d = km(RF + u \sum_{z=z_0}^{z=L_{cb}} f_i h_i) - u \sum_{z=0}^{z=z_0} f_{i,отр} h_i \quad (1.8)$$

где k – коэффициент однородности грунта; m – коэффициент условий работы; u – периметр сваи; F – площадь поперечного сечения сваи у острия; h_i – мощность i -го слоя по боковой поверхности сваи; R – нормативное сопротивление грунта под нижним концом сваи; f_i – нормативное сопротивление грунта i -го слоя по боковой поверхности сваи; L_{cb} – длина сваи; z_0 – глубина расположения «нулевой точки»; $f_{i,отр}$ – расчетное значение отрицательного трения;

- для сваи-стойки, опирающейся на скалу, вертикальные перемещения нижнего конца которой ничтожны, отрицательное трение практически распространяется по всей ее длине, а потому принимают:

$$F_d = kmRF - u \sum_{z=0}^{z=L_{cb}} f_{i,отр} h_i \quad (1.9)$$

Задача, практически, сводится к нахождению глубины расположения «нулевой точки» z_0 , чему собственно в основном и посвящена настоящая диссертационная работа.

Выводы по главе 1

1. Характерной особенностью инженерно-геологических условий прибрежной зоны г. Ханой является наличие обширных территорий, сложенных с поверхности слабыми водонасыщенными глинистыми грунтами, что предопределяет необходимость устройства свайных фундаментов при возведении зданий повышенной этажности, передающих на основание значительные нагрузки.

2. Развитие городского хозяйства и коммерческая деятельность предприятий требует откачек больших объемов пресной воды, что приводит к существенному понижению уровня подземных вод и, как следствие, развитию по боковым поверхностям свай сил отрицательного трения, которые увеличивают осевую нагрузку на них и вызывают дополнительную, в ряде случаев катастрофическую осадку возведенных зданий и сооружений.

3. Подавляющее большинство экспериментальных и теоретических работ, выполненных в России и других странах, посвящено изучению развития сил отрицательного трения и их учету при расчете несущей способности и осадок свай

в результате уплотнения грунтового массива под действием пригрузки его поверхности, вызванной различными причинами. Что касается учета сил отрицательного трения, вызванных водопонижением, то этот вопрос детально не исследовался и в нормативных документах не отражен, а проблема существует.

4. Изложенное в п.п. 1-3 настоящих Выводов позволяет тему диссертационной работы, посвященную исследованию работы свай в слабых водонасыщенных грунтах с учетом развития сил отрицательного трения по их боковой поверхности, вызванных водопонижением, и разработке метода их учета при проектировании свайных фундаментов, считать актуальной.

Цель и задачи настоящей диссертационной работы сформулированы во Введении.

ГЛАВА 2: ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ СВАЙ В СЛАБЫХ ГРУНТАХ С УЧЕТОМ РАЗВИТИЯ СИЛ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТРЕНИЯ ВЫЗВАННЫХ ВОДОПОНИЖЕНИЕМ

2.1 Постановка задачи, программа исследований

Задачей намеченных исследований являлось изучение динамики и закономерностей развития сил отрицательного трения на боковой поверхности сваи при водопонижении. 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 2.1. Ситуация является типичной для условий строительства в городе Ханой.

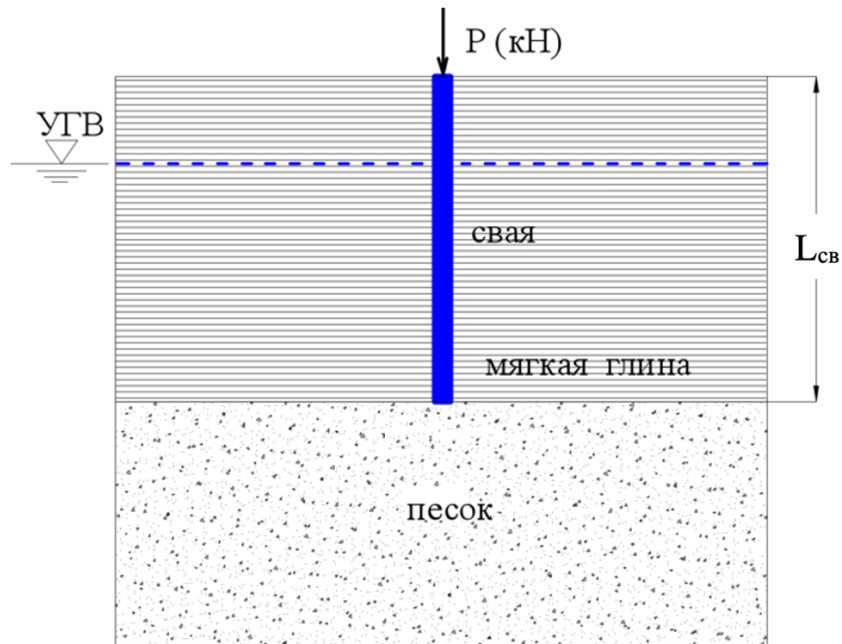


Рисунок 2.1 - Расчетная схема

На основе анализа имеющейся информации о работе свай в оседающем грунте предполагалось, что силы отрицательного трения, возникающие при оседании грунта, вызванного понижением уровня грунтовых вод, будут зависеть от глубины водопонижения h_w , диаметра сваи $D_{св}$, ее длины $L_{св}$, вертикальной нагрузки на сваю $P_{св}$ и от соотношения деформационных характеристик грунтов вдоль ствола сваи и под ее нижним концом $E_{пес}/E_{гл}$.

Начальный уровень грунтовой воды задавался у поверхности грунта и последовательно снижался на глубину, составляющую (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0) $L_{св}$.

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

Программа параметрических исследований приведена в Таблице 2.1.

Таблица 2.1. Программа параметрического исследования

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

Примечания: F_d - несущая способность сваи без учета водопонижения.

2.2 Численная конечно-элементная модель

Исследование влияния водопонижения на развитие сил отрицательного трения по боковой поверхности буровой одиночной сваи выполнялось численным методом на двухмерной модели с использованием ПК PLAXIS-2D. Расчетная схема задачи показана на Рисунке 2.2а, разбивка конечно-элементной сетки и граничные условия (закрепленные опоры с боковых сторон и снизу расчетной области) на Рисунке 2.2б.

Численная модель состояла из железобетонной буровой сваи длиной $L_{св}$, диаметром $D_{св}$, помещенной в уплотняющийся в результате водопонижения слой слабой глины, равный по мощности длине сваи и подстилаемый слоем плотного песка мощностью $0,8L_{св}$.

Слабая глина и песок моделировались моделью Hardening-soil, буровая свая – линейно-упругим материалом, как показано на Рисунке 2.3. Для имитации сил трения на боковой поверхности сваи устанавливается контактный элемент – интерфейс (Рисунок 2.3). Предельное смещение контактного элемента принималось равным $\gamma_{cr} = 5$ мм, а коэффициент трения $\mu = 0,32$.

Границы модели: ширина 25м, высота $1,8L_{св}$.

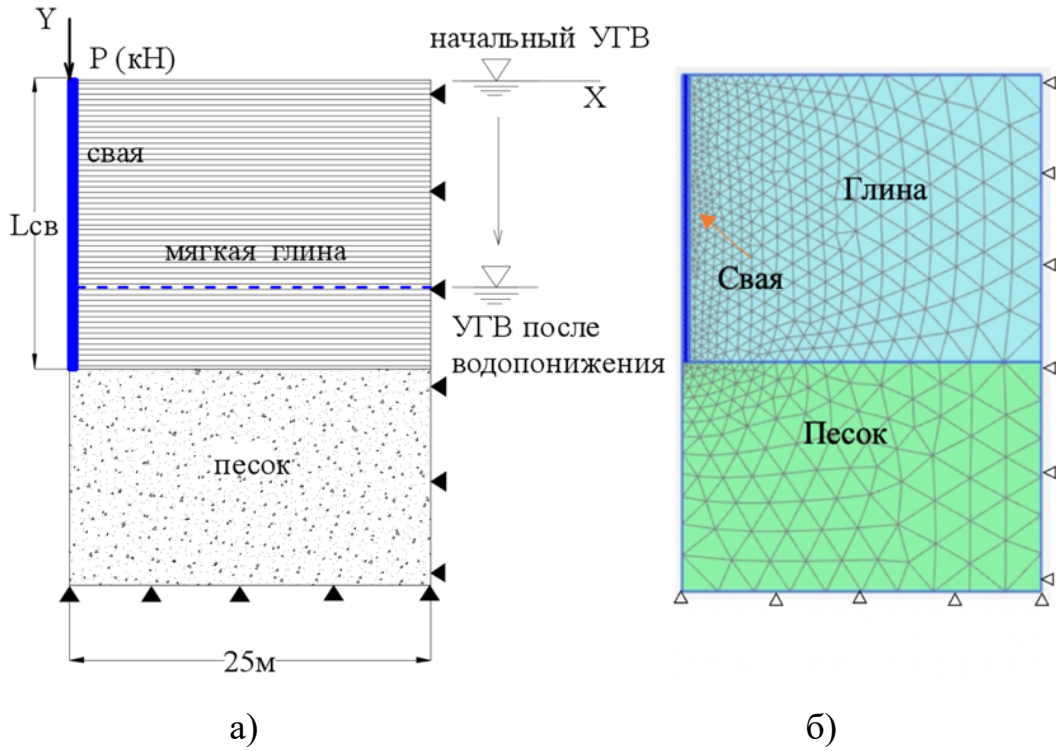


Рисунок 2.2 – Расчетная схема (а) и 2D схема конечно-элементной модели (б), граничные условия

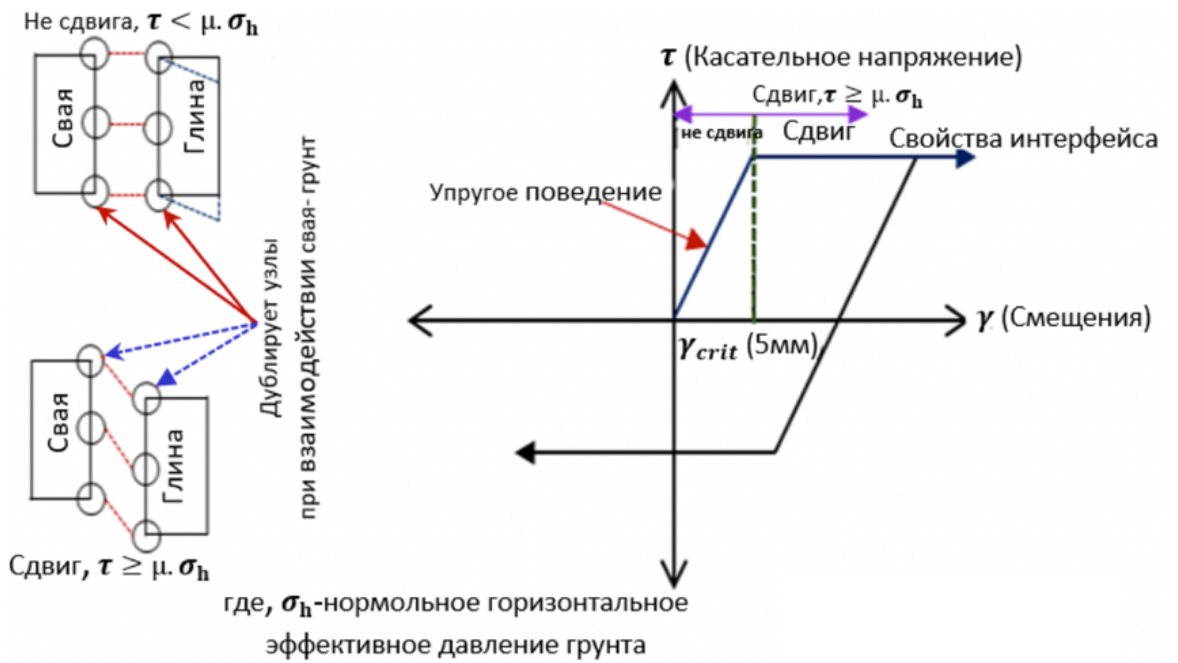


Рисунок 2.3 - Работа контактного элемента

Расчетные характеристики грунтов и материала сваи приведены в Таблице 2.2.

Таблица 2.2. 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. [62]).
2. Приведенные в таблице модули деформации песчаного грунта соответствуют расчетному случаю $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}=3$. Всего же в соответствии с программой параметрических исследований (см. Таблицу 2.1) выполнены расчеты для 4-х значений $E_{\text{пес}}$ ($8 \cdot 10^3$; $16 \cdot 10^3$; $24 \cdot 10^3$ и $32 \cdot 10^3$ кН/м²). Аналогичные значения приняты для E_{50} , E_{oed} и E_{ur} песчаного грунта.

2.3 Верификация конечно-элементной модели

Верификация разработанной конечно-элементной модели проведена с целью проверки возможности ее использования для проведения намеченных в НКР исследований. Верификация выполнялась путем сравнения результатов численного моделирования с использованием ПК PLAXIS-2D с результатами моделирования на центрифуге, выполненного Lee и описанного в Главе 1 настоящей диссертационной работы.

В расчете на натуральные размеры моделировалась работа сваи диаметром $D_{св} = 1,5\text{м}$, длиной $L_{св} = 22,5\text{м}$. Характеристики материалов при проведении моделирования на центрифуге и в численных расчетов приведены в Таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Конститутивные модели и характеристики материала

	Глина	Песок	Свая
модель	Hardening-soil	Hardening-soil	Linear elastic
γ_{unsat} (кН/м ³)	16,5	20	25
γ_{sat} (кН/м ³)	17	20,5	-
E (кН/м ²)	3067	$3 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^7$
E_{50} (кН/м ²)	3067	$30 \cdot 10^3$	-
E_{oed} (кН/м ²)	2453	$30 \cdot 10^3$	-
E_{ur} (кН/м ²)	9200	$90 \cdot 10^3$	-
e_0	0,6	0,5	-
C (кПа)	38	2	-
φ	12	32	-
ψ	0	2	-
ν	0,35	0,3	0,2

Примечание: 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. [62]).

Расчетная схема и сетка конечно-элементной модели и граничные условия показаны на Рисунке 2.4.

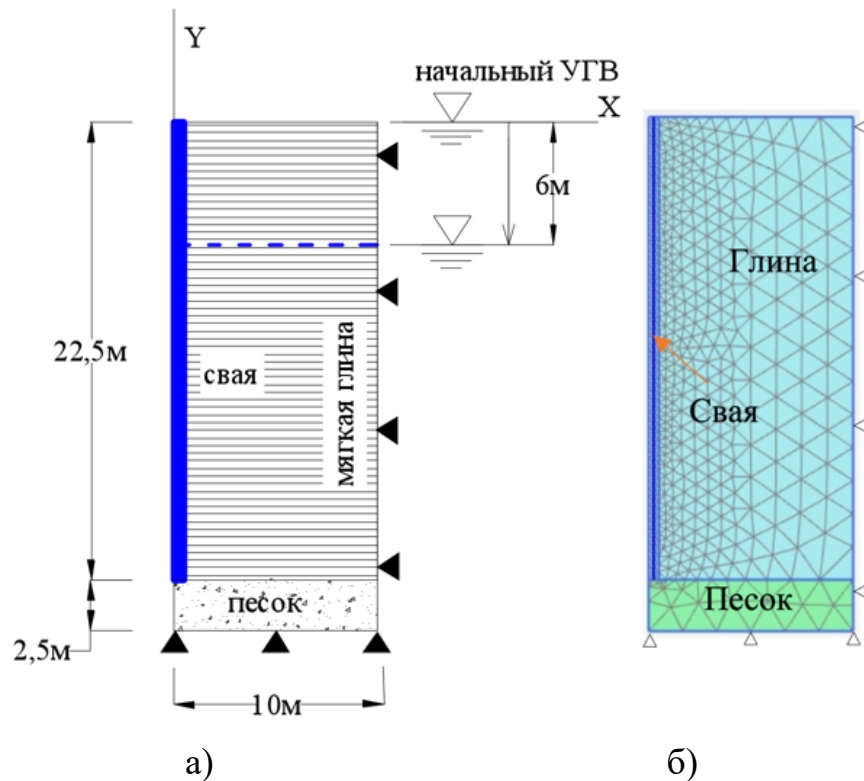


Рисунок 2.4 – Расчетная схема (а) и 2D схема конечно-элементной модели (б), граничные условия

Сравнение результатов 2D-моделирования в проведенном исследовании с результатами моделирования на центрифуге представлены на Рисунке 2.5. Хорошие корреляции наблюдаются между полученными и измеренными значениями осевых усилий в свае, что подтверждает возможность проведения исследований по изучению влияния водопонижения на работу одиночной сваи с использованием ПК PLAXIS-2D.

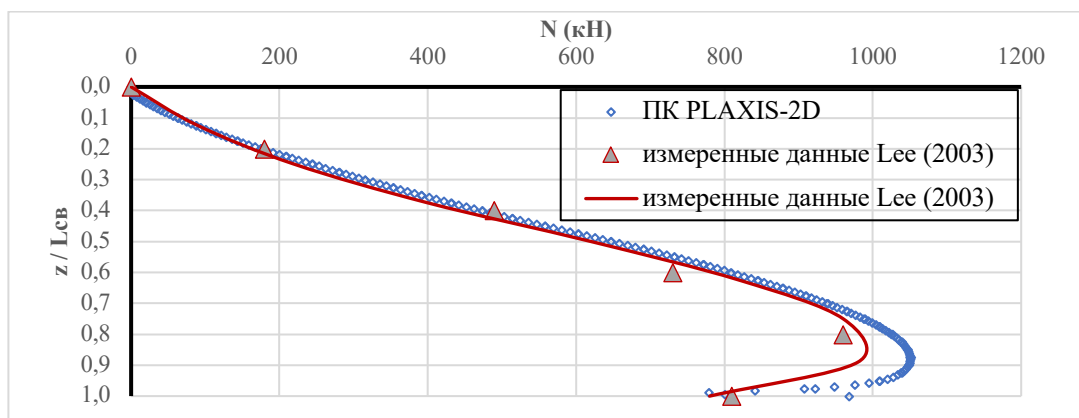


Рисунок 2.5 - Сравнение ПК PLAXIS-2D с измеренными данными

2.4 Результаты проведенных исследований

2.4.1 Одиночная свая без внешней вертикальной нагрузки

На Рисунке 2.6 на примере сваи длиной 17,5м, диаметром 0,8м показаны полученные выполненными расчетами графики изменения относительных смещений «свая – грунт» вдоль ствола сваи 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 2.7 - эпюры распределения сил трения по боковой поверхности сваи (а) и продольных усилий N по ее длине (б).

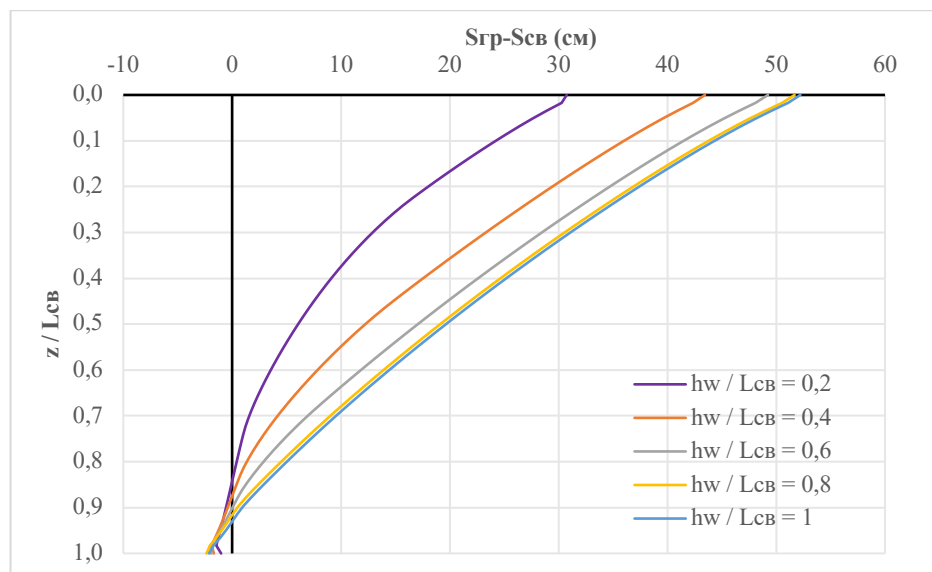


Рисунок 2.6 – Изменение относительных смещений «свая – грунт» вдоль ствола сваи при различных уровнях водопонижения

$$(L_{св} = 17,5\text{м}; D_{св} = 0,8\text{м}, E_{пес}/E_{гл} = 3)$$

Очевидно, 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 ее увеличения.

Эпюры распределение сил трения по боковой поверхности сваи и продольных усилий по ее длине соответствуют описанному выше механизму взаимодействия сваи с оседающей по той или иной причине грунтовой толщ. Эпюры идентичны описанным Далматовым Б.И., Лапшиным Ф.К. и Россихиным

Ю.В. [12], 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 причин, основными из которых при одном и том же уровне водопонижения являются характеристики сжимаемости грунта вдоль боковой поверхности сваи и в основании ее нижнего конца, что требует проведения более детальных исследований.

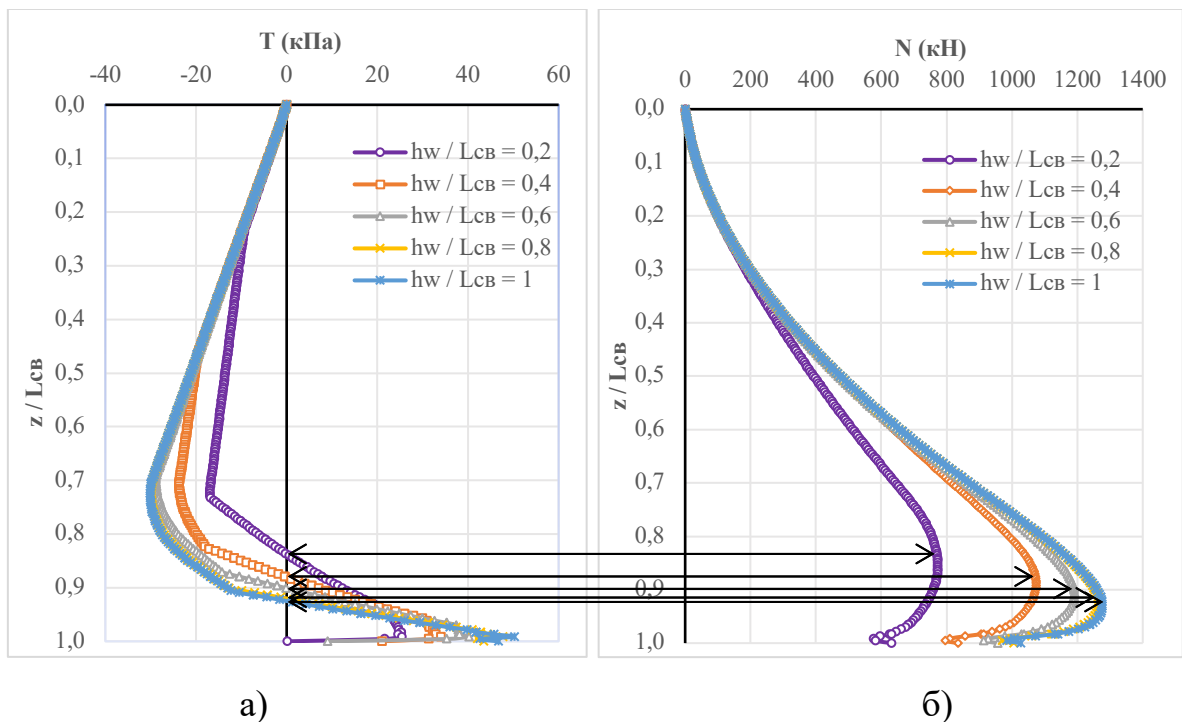


Рисунок 2.7 – Распределение сил трения по боковой поверхности сваи (а) и продольных усилий по ее длине (б) ($L_{св} = 17,5\text{М}$, $E_{пес}/E_{гл} = 3$)

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 ее нижним концом и вдоль боковой поверхности, идентичны представленным на рисунках 2.6 и 2.7.

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 для ненагруженных внешней вертикальной силой свай различной длины и диаметра при различных соотношениях $E_{пес}/E_{гл}$, приведены в Приложении А и Б.

2.4.2 Одиночная нагруженная свая

Вертикальная нагрузка на сваю вызывает ее осадку, что отражается на графиках относительных смещений ($S_{гр} - S_{св}$), а, следовательно, и распределении касательных напряжений по боковой поверхности сваи, характеризуемых положением нейтральной плоскости, или, как принято говорить, подождением «нулевой точки», которая при приложении внешней нагрузки на сваю смещается вниз.

На Рисунке 2.8 на примере нагруженной сваи длиной 17,5м, диаметром 0,8м показаны полученные выполненными расчетами графики изменения относительных смещений «свая – грунт» вдоль ствола сваи в зависимости от нормализованной глубины $z/L_{св}$ для различных значений нормализованной глубины водопонижения $h_w/L_{св}$ при отношении $P_{св}/F_d = 0,6$ и $E_{пес}/E_{гл} = 3$, а на Рисунках 2.9 - эпюры распределения сил трения по боковой поверхности сваи (а) и продольных усилий по ее длине (б).

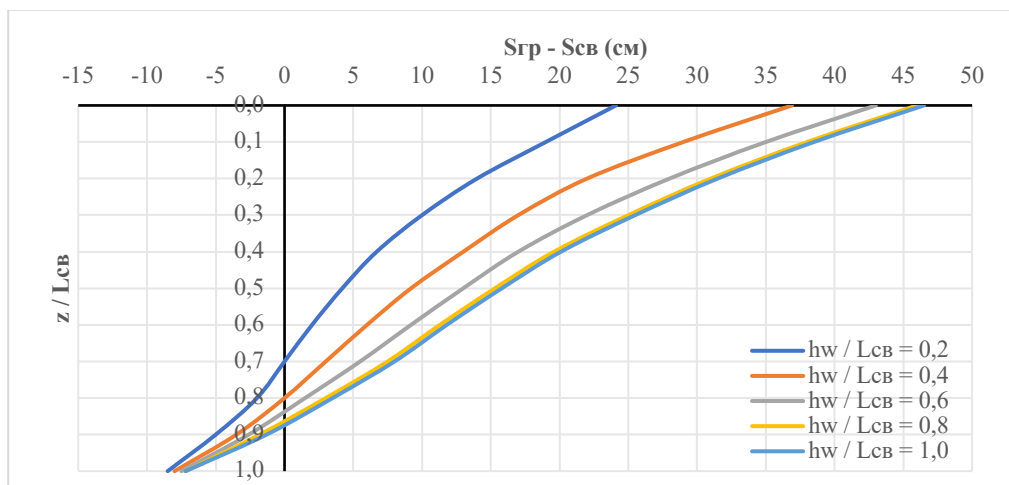


Рисунок 2.8 – Изменение относительных смещений «свая – грунт» вдоль ствола нагруженной сваи ($L_{св} = 17,5\text{м}$; $D_{св} = 0,8\text{м}$; $P_{св}/F_d = 0,6$; $E_{пес}/E_{гл} = 3$)

Как и в случае ненагруженной сваи смещение грунта относительно сваи (S_{zp} - S_{ce}) интенсивно снижается с глубиной при любой глубине водопонижения, но разница между ними на одном и том же уровне уменьшается при ее увеличении.

Эпюры распределение сил трения по боковой поверхности сваи и продольных усилий по ее длине также аналогичны полученным при расчете ненагруженных свай, а нулевые точки смещены к нижней трети сваи, однако у нагруженных свай, при прочих равных условиях, они расположены несколько выше.

Аналогичные графики были построены для всего диапазон влияющих на распределение сил трения на боковой поверхности сваи и продольных усилий по ее длине, которые показали их полную идентичность графикам на Рисунке 2.9.

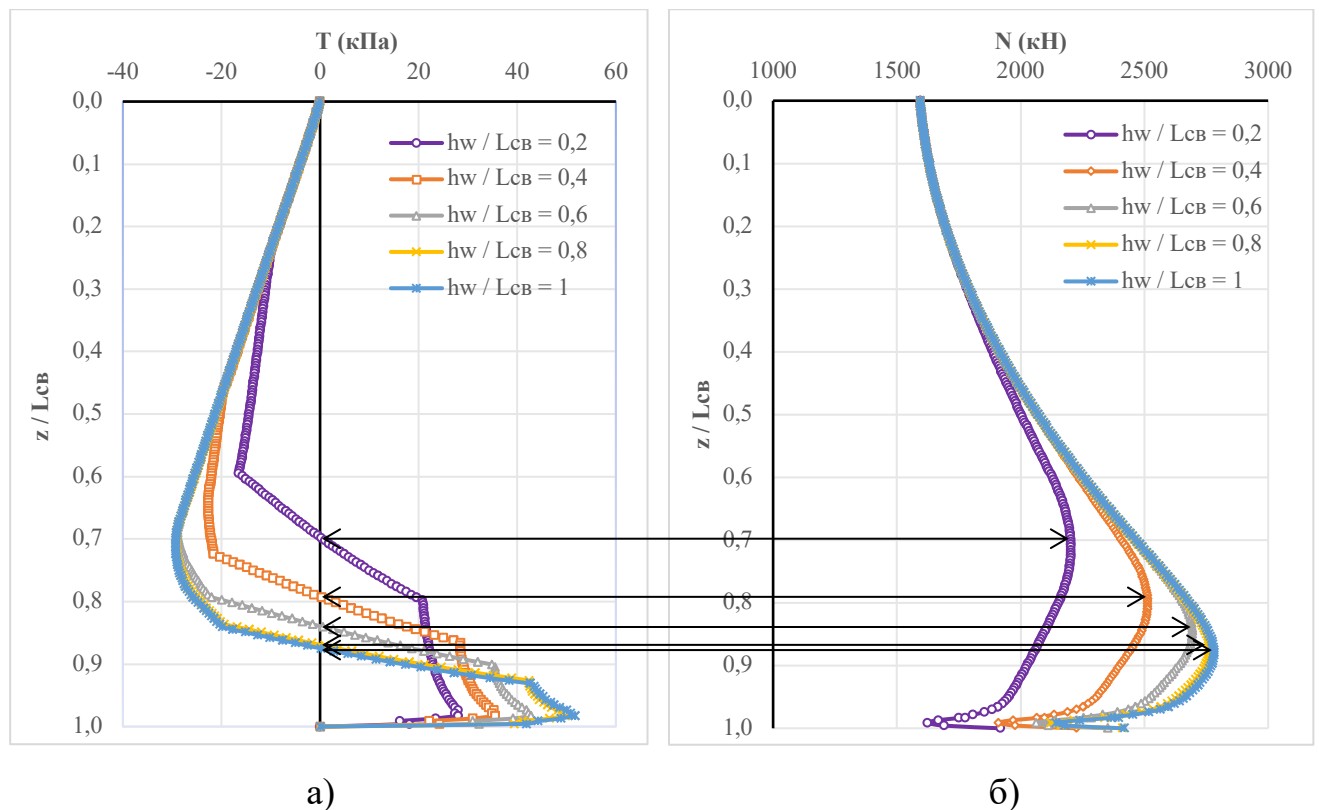


Рисунок 2.9 – Распределение сил трения по боковой поверхности сваи (а) и продольных усилий по ее длине (б)

$$(L_{cb} = 17,5\text{м}; D_{cb} = 0,8\text{м}; P_{cb}/F_d = 0,6; E_{пес}/E_{гл} = 3)$$

Полная информация о результатах расчетов положения «нулевой точки» (z_0 , z_0/L_{cb}), максимальных осевых усилий в свае (N_{max}) и нагрузок, передающихся на

грунт через ее нижний конец (N_L), выполненных для нагруженных внешней вертикальной силой свай различной длины и диаметра при различных соотношениях $E_{пес}/E_{гл}$ и $P_{св}/F_d$ приведены в Приложении В и Г.

2.4.3 Параметрический анализ результатов исследования

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

В Таблице 2.5 приведены данные о степени снижении несущей способности свай различной длины и диаметра в рассмотренных грунтовых условиях в результате водопонижения при отношении $E_{пес}/E_{гл} = 3$. За степень снижения несущей способности свай U принималось отношение $(F_d - F_d^*) / F_d$ (%), где F_d – несущая способность свай до водопонижения, определенная по ПК PLAXIS-2D; F_d^* – несущая способность свай с учетом действия сил отрицательного трения.

Для наглядности установленные закономерности изменения U приведены в графическом виде на рисунках 2.10 и 2.11.

Таблица 2.5 – Снижение несущей способности свай, вызванное водопонижением

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

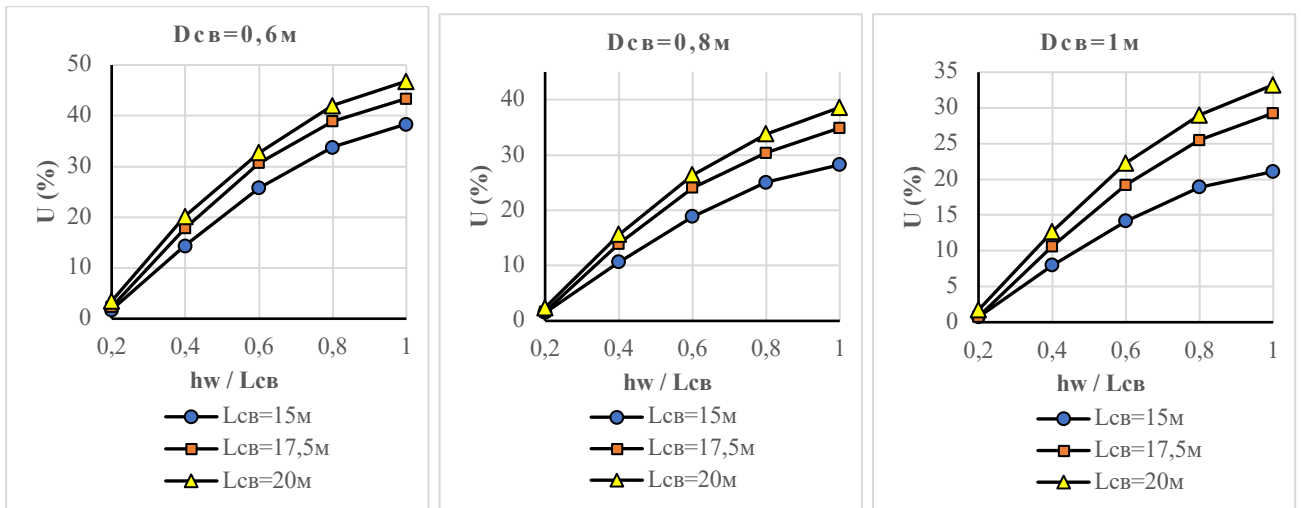


Рисунок 2.10 – Зависимость степени снижения несущей способности свай U от нормализованной глубины понижения уровня подземных вод h_w/L_{cb} для свай различной длины

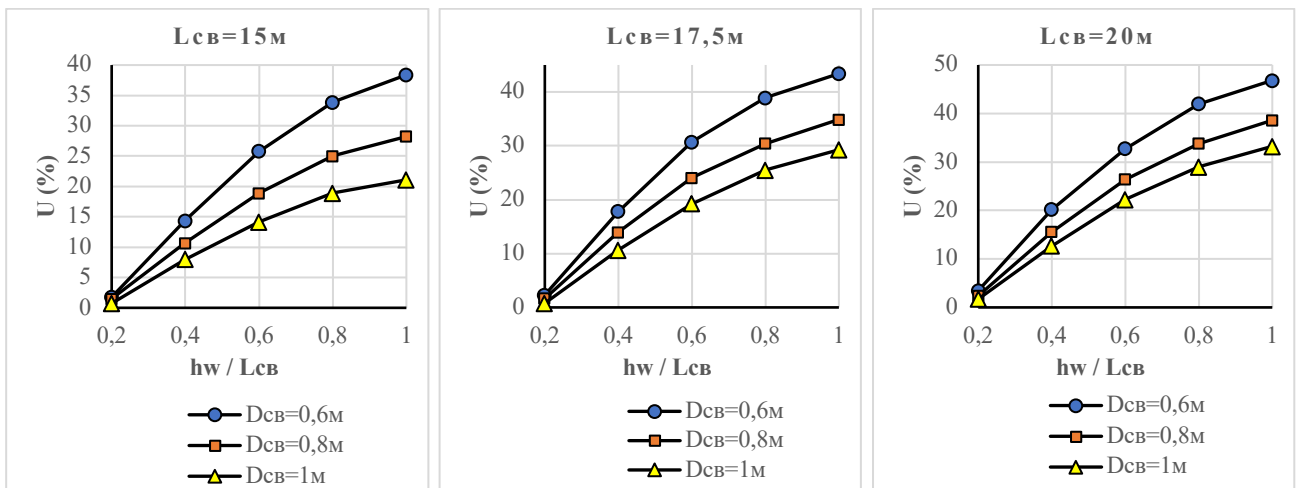


Рисунок 2.11 – Зависимость степени снижения несущей способности свай U от нормализованной глубины понижения уровня подземных вод h_w/L_{cb} для свай различного диаметра

Данные, приведенные в Таблице 2.5 и графики на Рисунках 2.10, 2.11 показывают существенное снижение несущей способности свай в результате развития сил отрицательного трения по ее боковой поверхности, вызванных понижением уровня подземных вод. Уже при глубине водопонижения, составляющей $0,6 L_{cb}$, степень снижения несущей способности свай в зависимости от ее длины и диаметра может составлять порядка 30%, а при понижении уровня подземных вод на всю длину свай степень снижения свай длиной более 17,5 м может быть более 40%. В целом степень снижения несущей способности свай U

увеличивается с глубиной водопонижения и длины сваи и уменьшается по мере увеличения ее диаметра. Следует также отметить, что с увеличением отношения $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}$ степень снижения несущей способности сваи, вызванного понижением уровня подземных вод будет увеличиваться.

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

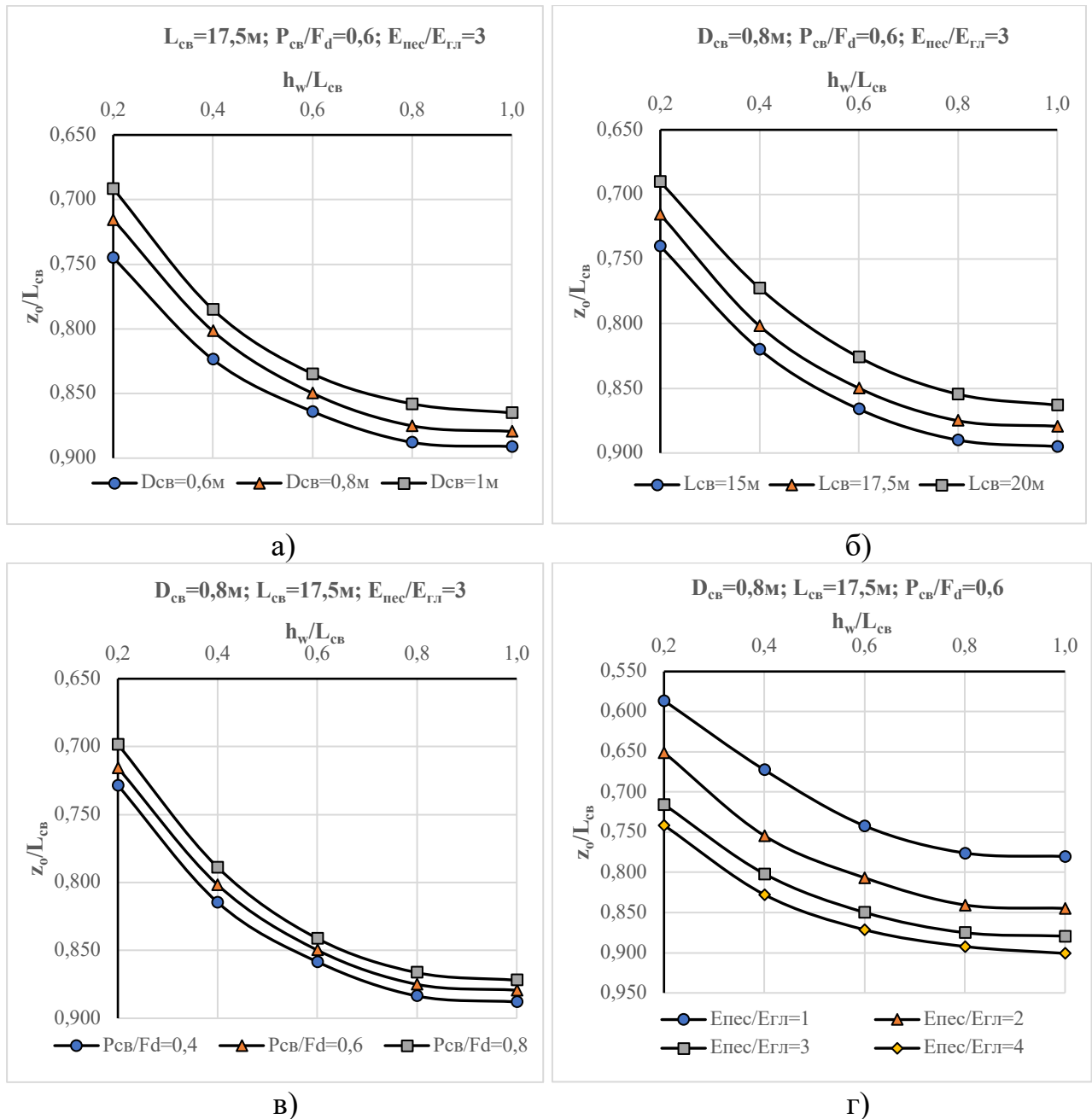


Рисунок 2.12 – Графики зависимости $z_0/L_{\text{св}} = f(h_w/L_{\text{св}})$:

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

в) для различных $P_{\text{св}}/F_d$; г) для различных $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}$

На Рисунке 2.12 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 , выраженная через натурализованную глубину $z_0/L_{св}$, увеличивается с увеличением глубины понижения уровня подземных вод, выраженной через натурализованную глубину водопонижения $h_w/L_{св}$, 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.

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

На Рисунке 2.13 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 $E_{пес}/E_{гл}$.

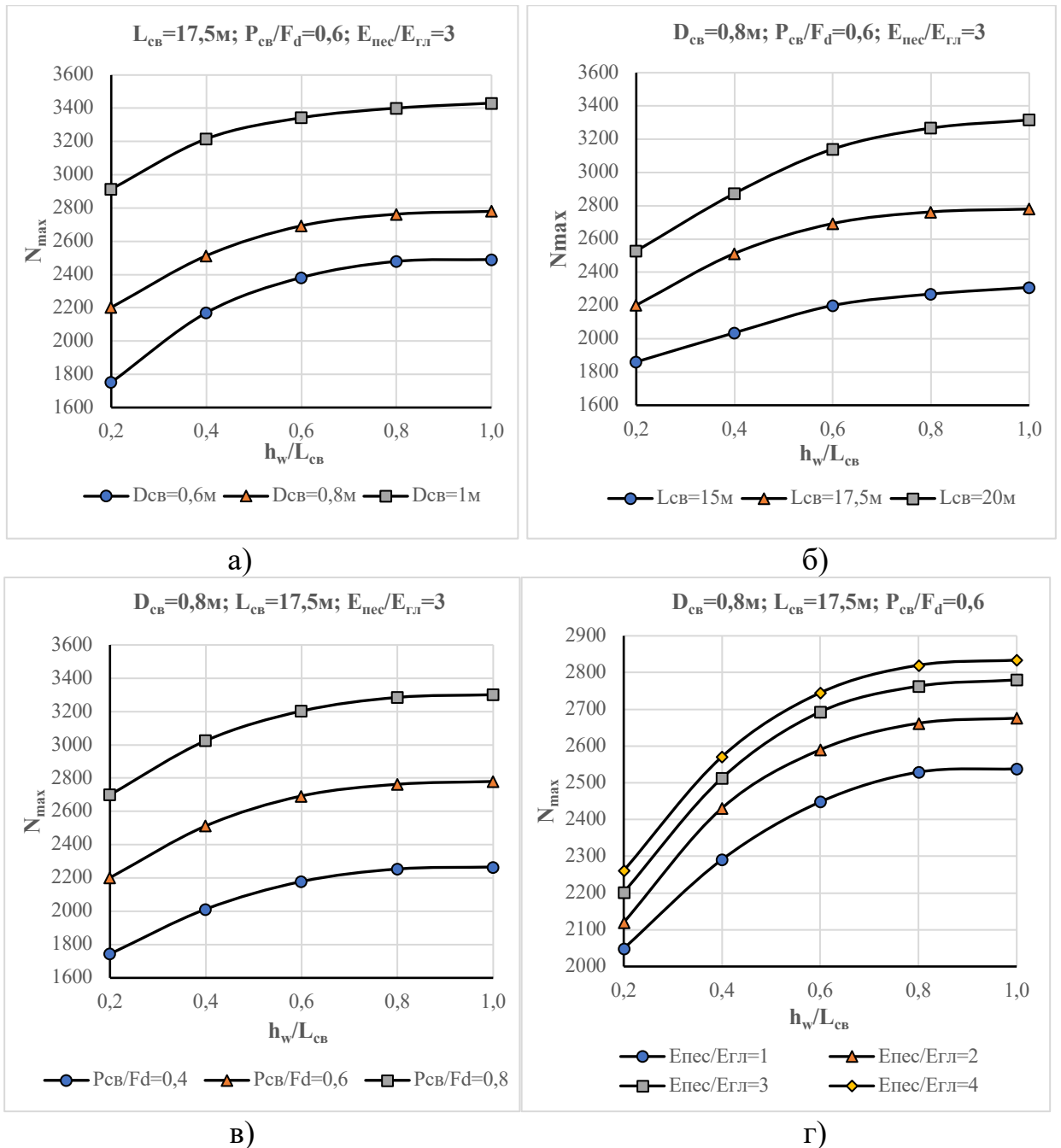


Рисунок 2.13 – Графики зависимости $N_{max} = f(h_w/L_{cb})$:

- а) для различных D_{cb} ; б) для различных L_{cb} ;
 в) для различных P_{cb}/F_d ; г) для различных $E_{пес}/E_{гл}$

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

На Рисунке 2.14 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 $E_{пес}/E_{гл}$.

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.

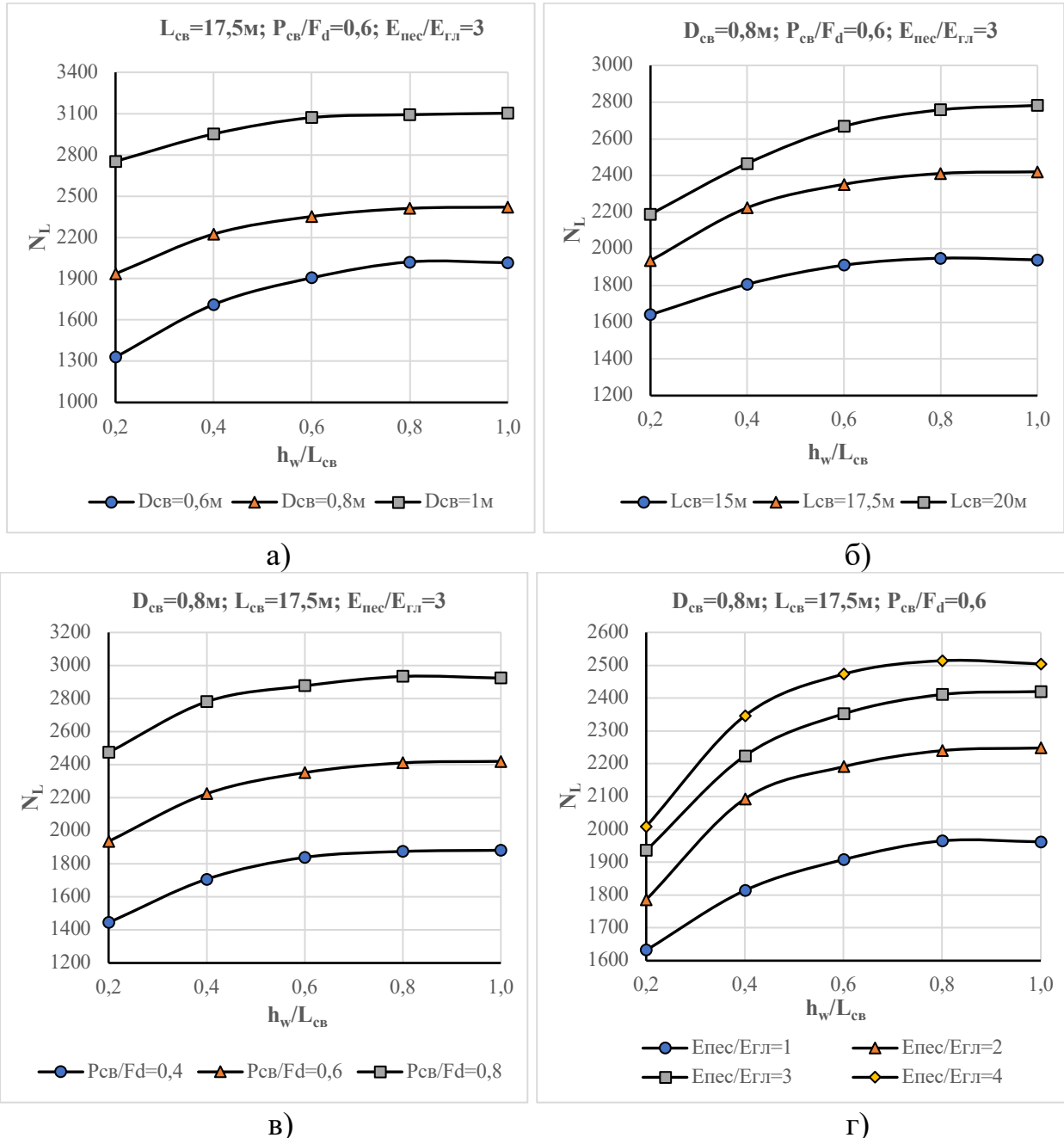


Рисунок 2.14 – Графики зависимости $N_L = f(h_w/L_{cb})$:

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

в) для различных P_{cb}/F_d ; г) для различных $E_{пес}/E_{гл}$

Из представленных графиков видно, что влияние снижения уровня подземных вод на положение «нулевой точки», максимальные продольные усилия

в свае и нагрузку, передающуюся на грунт через ее нижний конец, в наибольшей степени проявляется при наличии под нижним концом сваи жесткого слоя. Более точную оценку относительной силы влияния каждого из рассмотренных факторов на положение «нулевой точки» и усилия в свае будет выполнено в представленном в следующей главе математико-статистическом анализе результатов проведенных экспериментов, носящего название факторного анализа.

Выводы по главе 2

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

2. Численные исследования мобилизации сил отрицательного трения по боковой поверхности буровой сваи, вызванных понижением уровня подземных вод, и их зависимости от различных факторов, выполненные с использованием программного комплекса PLAXIS 2D, показали следующее:

- глубина расположения «нулевой точки» z_0 , определяющей степень развития сил отрицательного трения по боковой поверхности сваи при водопонижении, увеличивается с увеличением глубины водопонижения и жесткости грунта под ее нижним концом и уменьшается с увеличением ее длины, диаметра и нагрузки на голову сваи;

- касательное напряжение по боковой поверхности сваи увеличивается с увеличением глубины водопонижения независимо от длины сваи, ее диаметра, жесткости грунта под нижним концом сваи и приложенной нагрузки;

- максимальное осевое усилие в свае увеличивается с увеличением глубины водопонижения, длины и диаметра сваи, модуля деформации грунта под ее нижним концом и действующей нагрузки;

- нагрузка на нижний конец сваи увеличивается с увеличением глубины водопонижения, длины и диаметра сваи, модуля деформации грунта под ее нижним концом и действующей нагрузки.

3. Выполненные численные расчеты подтвердили результаты ранее проведенных исследований по изучению влияния оседания окружающего сваю грунта на развитие сил отрицательного трения по ее боковой поверхности. Полученные эпюры распределение сил трения по боковой поверхности сваи и продольных усилий по ее длине при водопонижении идентичны описанным Далматовым Б.И. [12], рассматривавшим оседание грунтовой толщи, вызванной нагрузкой на ее поверхности.

4. Оценка относительной силы влияния каждого из рассмотренных факторов на положение «нулевой точки» и усилия в свае будет выполнено в представленном в следующей главе математика-статистическом анализе результатов проведенных экспериментов, носящего название факторного анализа.

ГЛАВА 3: МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Основные положения

Математико-статистический анализ результатов проведенных исследований выполнен на основе теории планирования эксперимента, позволяющей существенно сократить объем расчетов для выявления влияния изменения уровня грунтовых вод h_w на положение «нулевой точки» и степени зависимости этого влияния от различных факторов, к которым относятся диаметр $D_{св}$ и длина сваи $L_{св}$, уровень нагружения сваи вертикальной нагрузкой $P_{св}/F_d$, соотношение модулей деформации грунта под нижним концом сваи и вдоль ее ствола ($E_{пес}/E_{гл}$), и каждый из которых изменяется индивидуально при постоянных значениях других факторов.

Результатом математико-статистического анализа, который принято называть факторным анализом, является функция, описывающая взаимосвязь отклика « Y » с множеством входных факторов X_1, X_2, \dots, X_m и их ранжирование по силе влияния на результат [3, 4, 72]:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (3.1)$$

Здесь фактор – это параметр, принимающий вариативные значения в зависимости от описываемой ситуации. Эти значения входят в область определения, ограничивающую верхнее и нижнее значение фактора. Множество областей определения факторов, учитываемых в модели, является областью эксперимента.

На практике факторное пространство масштабируют для унификации значений по границам верхнего края как «+1» и нижнего как «-1». Такое масштабирование, если известно, что фактор имеет непрерывающуюся область определения, проводится с использованием следующего преобразования [3, 4, 72]:

$$X_j = \frac{x_j - x_{j0}}{I_j}; j = 1, \dots, m, \quad (3.2)$$

где X_j - значение i -го фактора в закодированном представлении; x_j - значение

-го фактора (натуральное); x_{j0} - значение основного уровня j -го фактора (натуральное); I_j - интервал допустимых значений j -го фактора; m – число факторов, влияющих на результат.

Кодированное значение используется в целях упрощения обработки результатов и определения степени влияния каждого из факторов, то есть выведения веса каждого фактора.

С достаточной точностью при проведении расчетов допускается, что функцию отклика (3.1) можно описать полиномом, который носит название полиномиальной регрессии:

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^m b_j X_j + \sum_{j,k=1}^m b_{jk} X_j X_k + \dots \quad (3.3)$$

Члены данного полинома $b_j X_j$ находятся в соответствии с линейными эффектами; $b_{jk} X_j X_k$ ($j \neq k$) – описывают эффекты при взаимодействии первого порядка; $b_{jj} X_j^2$ - определяют квадратичные эффекты и т.д.

Переменные b_0, b_j, b_{jk} и т.д. называются коэффициентами уравнения.

Матрица, задающая в совокупности своих значений в столбцах и строках количество опытов и условия их протекания, называется планом эксперимента. Коэффициенты модели, благодаря ей, определяются необходимым и достаточным образом.

Полнофакторный эксперимент, то есть такой, который исчерпывающе учитывает взаимодействие всех факторов во всех их сочетаниях, дает возможность построить полнофункциональную модель. Выполнение полнофакторного эксперимента предусматривает варьирование факторами в пределах $+1$ и -1 , количество таких сочетаний (точек) равняется 2^m , где m – количество учитываемых факторов.

Далее в настоящем исследовании проведено построение плана эксперимента на основе результатов выполненного численного моделирования.

Выполнение и обработка результатов эксперимента производится в следующей последовательности:

1. Определяется дисперсия воспроизводимости эксперимента $S_{\text{воспр}}^2$ [3, 4,

63]:

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{q=1}^N \sum_{i=1}^n (Y_{iq} - \bar{Y})^2}{N(n-1)}, \quad (3.4)$$

где:

\bar{Y} - средние арифметические значения результатов для каждой точки:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}; \quad (3.5)$$

S^2 - дисперсия результатов эксперимента [3, 4, 63]:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n}; \quad (3.6)$$

n – повторяемость опытов; N – число точек в плане эксперимента; i - номер точки.

2. Вычисляются коэффициенты уравнения полиномиальной регрессии.

Для определения этих коэффициентов используют метод наименьших квадратов. В общем случае матричное уравнение метода наименьших квадратов записывается в виде [3, 4, 72]:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (3.7)$$

где b - матрица-столбец коэффициентов; X - матрица-план эксперимента; X^T - транспонированная матрица; $(X^T X)^{-1}$ - матрица, обратная произведению $X^T X$; Y - вектор-столбец значений функции отклика.

3. Оценивается значимость коэффициентов уравнения регрессии, используя критерий Стьюдента.

Определяют доверительный интервал [3, 4, 72]:

$$\Delta b = \pm S_{bj}, \quad (3.8)$$

$$S_{bj} = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{N} \quad (3.9)$$

Если абсолютная величина коэффициента уравнения регрессии больше, чем доверительный интервал, то рассматриваемый коэффициент считается значимым. Коэффициенты, признанные незначимыми, отбрасываются.

4. Проверяется адекватность выбранной модели.

Используя критерий Фишера, производится проверка адекватности описания функции отклика модели [3, 4, 72]:

$$F = \frac{S_{\text{неадекват}}^2}{S_{\text{воспр}}^2} \leq F_{\text{табл}}, \quad (3.10)$$

где $F_{\text{табл}}$ - табулированное значение критерия Фишера:

$$S_{\text{неадекват}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - y_i)^2}{N - m}, \quad (3.11)$$

где m – количество значимых коэффициентов уравнения регрессии, включая b_0 ; y_i - экспериментальное значение отклика в i -ой точке; Y_i - значение отклика, предсказываемое полученным уравнением регрессии.

В случае использования линейной и неполной квадратичной модели, необходимо проверить дополнительно значимость коэффициентов уравнения регрессии соответствующих квадратичным членам [3, 4, 72]:

$$\sum b_{ij} = Y_0 - b_0, \quad (3.12)$$

где Y_0 – абсолютное значение функции отклика в центральной области эксперимента.

В случае, если расчеты позволяют признать текущую модель неадекватной, следует разработать модель более высокого порядка, выполняя все указанные этапы, при необходимости повышая порядок до тех пор, пока модель не будет соответствовать критерию адекватности. После получения подтверждения адекватности модели становится возможным анализ и обобщение результатов. Преобразование кодированных значений, используемых в уравнении регрессии, в натуральные величины производится по формуле (3.1).

В настоящей главе представлены результаты математико-статистического анализа влияния водопонижения на глубину расположения «нулевой точки», выполненного для трех случаев:

В настоящей главе разработано 3 варианта математикой модели взаимодействия одиночной буровой сваи с оседающим в результате понижения уровня подземных вод грунтом:

- 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);

- пакет 4-х факторных моделей для четырех различных значений модульного соотношения $E_{пес}/E_{гл}$

3.2 Одиночная свая с вертикальной нагрузкой

3.2.1 Математическая модель эксперимента

Таблица 3.1 представляет перечень выбранных факторов с указанием их интервалов варьирования и уровня значимости.

Таблица 3.1 - Уровни факторов и интервалы их варьирования

Факторы	Уровни факторов		Интервал варьирования
	-1	+1	
$X_1 - h_w/L_{св}$	0,2	0,8	0,60
$X_2 - D_{св}$	0,6	1	0,40
$X_3 - L_{св}$	15	20	5,00
$X_4 - P_{св}/F_d$	0,4	0,8	0,4
$X_5 - E_{пес}/E_{гл}$	1	4	3

При использовании в математической модели планирования эксперимента 5-ти факторов уравнение (3.2) запишется в виде:

$$\begin{aligned}
 Y = & b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i X_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 5} b_{ij} X_i X_j + \sum_{1 \leq i < j < k \leq 5} b_{ijk} X_i X_j X_k + \sum_{1 \leq i < j < k < l \leq 5} b_{ijkl} X_i X_j X_k X_l \\
 & + \sum_{1 \leq i < j < k < l < m \leq 5} b_{ijklm} X_i X_j X_k X_l X_m + \sum_{1 \leq i < j < k < l < m \leq 5} b_{ijklm} X_i X_j X_k X_l X_m \\
 & + b_{12345} X_1 X_2 X_3 X_4 X_5
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Линейное значение эффекта каждого фактора оценивается величиной коэффициентов b_i , а коэффициенты $b_{ij...m}$ – характеризуют степень влияния факторов.

При наличии количества факторов, равного k , разработка полного

факторного плана эксперимента потребует проведения следующего количества опытных наблюдений: $N = m^k$, где N – число требующихся опытов; m – количество уровней; k – число отобранных факторов.

Согласно такой модели, план эксперимента характеризуется следующими особенностями:

- присутствует симметрия относительно центральной точки в любом направлении, сумма элементов в любом из столбцов матрицы плана равна нулю:

$$\sum_{n=1}^N X_{in} = 0; i = 1, 2, \dots, k;$$

- в любом из столбцов сумма квадратов элементов равна количеству опытов, таким образом можно утверждать, что план нормирован: $\sum_{n=1}^N X_{in}^2 = N; i = 1, 2, \dots, k;$

- также равна нулю сумма почленных произведений в любых парах столбцов, поэтому план также ортогонален: $\sum_{n=1}^N X_{in}X_{jn} = 0; i \neq j; i = 1, 2, \dots, k;$

- поскольку подбор точек в матрице реализован так, что параметр оптимизации имеет точность, одинаковую на равноудаленных от центра расстояниях, можно констатировать ротатабельность плана вне зависимости от направления такого расчета.

В таблице 3.2 приведена матрица планирования и результаты расчетов для 5 факторов: уровня грунтовых вод $h_w/L_{св}$, диаметра $D_{св}$ и ее длины $L_{св}$, уровня нагружения сваи вертикальной нагрузкой $P_{св}$ и соотношения модулей деформации грунта под нижним концом сваи и вдоль ее ствола ($E_{пес}/E_{гл}$).

Таблица 3.2 – Матрица планирования и результаты расчетов

№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	h_w/L_{CB}	D_{CB}	L_{CB}	P_{CB}/F_d	$E_{пес}/E_{ГЛ}$	У
1	-1	-1	-1	-1	-1	0,2	0,6	15	0,4	1	0,650
2	1	-1	-1	-1	-1	0,8	0,6	15	0,4	1	0,825
3	-1	1	-1	-1	-1	0,2	1	15	0,4	1	0,570
4	1	1	-1	-1	-1	0,8	1	15	0,4	1	0,788
5	-1	-1	1	-1	-1	0,2	0,6	20	0,4	1	0,629
6	1	-1	1	-1	-1	0,8	0,6	20	0,4	1	0,787
7	-1	1	1	-1	-1	0,2	1	20	0,4	1	0,533
8	1	1	1	-1	-1	0,8	1	20	0,4	1	0,746
9	-1	-1	-1	1	-1	0,2	0,6	15	0,8	1	0,631
10	1	-1	-1	1	-1	0,8	0,6	15	0,8	1	0,806
11	-1	1	-1	1	-1	0,2	1	15	0,8	1	0,519
12	1	1	-1	1	-1	0,8	1	15	0,8	1	0,775
13	-1	-1	1	1	-1	0,2	0,6	20	0,8	1	0,576
14	1	-1	1	1	-1	0,8	0,6	20	0,8	1	0,764
15	-1	1	1	1	-1	0,2	1	20	0,8	1	0,377
16	1	1	1	1	-1	0,8	1	20	0,8	1	0,741
17	-1	-1	-1	-1	1	0,2	0,6	15	0,4	4	0,806
18	1	-1	-1	-1	1	0,8	0,6	15	0,4	4	0,910
19	-1	1	-1	-1	1	0,2	1	15	0,4	4	0,763
20	1	1	-1	-1	1	0,8	1	15	0,4	4	0,913
21	-1	-1	1	-1	1	0,2	0,6	20	0,4	4	0,789
22	1	-1	1	-1	1	0,8	0,6	20	0,4	4	0,899
23	-1	1	1	-1	1	0,2	1	20	0,4	4	0,712
24	1	1	1	-1	1	0,8	1	20	0,4	4	0,873
25	-1	-1	-1	1	1	0,2	0,6	15	0,8	4	0,761
26	1	-1	-1	1	1	0,8	0,6	15	0,8	4	0,881
27	-1	1	-1	1	1	0,2	1	15	0,8	4	0,731
28	1	1	-1	1	1	0,8	1	15	0,8	4	0,888
29	-1	-1	1	1	1	0,2	0,6	20	0,8	4	0,708
30	1	-1	1	1	1	0,8	0,6	20	0,8	4	0,882
31	-1	1	1	1	1	0,2	1	20	0,8	4	0,637
32	1	1	1	1	1	0,8	1	20	0,8	4	0,849

3.2.2 Оценка параметров модели

Расчет дисперсии опытов

Формула для определения средней дисперсии, применяемая к каждому проведенному опыту, имеет следующий вид [3, 4, 72]:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{n=1}^N S_{yn}^2}{N} \quad (3.14)$$

где S_{yn}^2 - дисперсия опыта в каждой строке, вычисляемая как:

$$S_{yn}^2 = \frac{\sum_{q=1}^{y_n} (Y_{nq} - Y_n)^2}{f_n} \quad (3.15)$$

Где Y_{nq} – результат q -го повтора n -го опыта; Y_n - среднее арифметическое значение n -го опыта; f_n - количество степеней свободы применительно к расчету n -ой дисперсии в данной строке: $f_n = n - 1$. В ходе эксперимента опыты повторялись дважды, поэтому принимаем значение $f_n = 1$.

Дисперсии для каждой строки указаны в последнем столбце Таблицы 3.3.

Для проверки однородности ряда построчных дисперсий используется критерий Кохрена для проверки однородности дисперсии в каждой строке, вычисления ведутся по формуле [3, 4, 72]:

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{уп(мак)}}^2}{\sum_{n=1}^{N_0} S_{\text{уп}}^2} \leq G_{\text{табл}} , \quad (3.16)$$

где $S_{\text{уп(мак)}}^2$ – максимальная дисперсия ряда, составляющая 0,048839; N_0 – количество проведенных опытов, включая дублирующие: $G_{\text{расч}} = \frac{0,048839}{0,312779} \approx 0,156$.

Табличное значение $G_{\text{табл}}$ определяется по [9] с использованием критерия Кохрена, величина значимости $\alpha = 0,05$, количество степеней свободы $f_n = 1$ при числе опытов $N=32$. Сопоставление данных с таблицей дает $G_{\text{табл}} \approx 0,282$.

Так как $G_{\text{расч}} \approx 0,156 < G_{\text{табл}} \approx 0,282$, верно утверждение об однородности дисперсионного ряда.

Средняя дисперсия, определенная по формуле (3.14), равна $S_y^2 = \frac{0,312779}{32} = 0,00977$.

Число степеней свободы анализируемого эксперимента $f_1 = N(n-1) = 32 * 1 = 32$.

Таблица 3.3 – Значения дисперсия результатов

№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y	S_{yn}^2
1	-1	-1	-1	-1	-1	0,650	0,001250
2	1	-1	-1	-1	-1	0,825	0,000450
3	-1	1	-1	-1	-1	0,570	0,042050
4	1	1	-1	-1	-1	0,788	0,013602
5	-1	-1	1	-1	-1	0,629	0,009660
6	1	-1	1	-1	-1	0,787	0,000929
7	-1	1	1	-1	-1	0,533	0,028800
8	1	1	1	-1	-1	0,746	0,013629
9	-1	-1	-1	1	-1	0,631	0,002631
10	1	-1	-1	1	-1	0,806	0,001955
11	-1	1	-1	1	-1	0,519	0,048839
12	1	1	-1	1	-1	0,775	0,011250
13	-1	-1	1	1	-1	0,576	0,002422
14	1	-1	1	1	-1	0,764	0,001275
15	-1	1	1	1	-1	0,377	0,106583
16	1	1	1	1	-1	0,741	0,009563
17	-1	-1	-1	-1	1	0,806	0,003373
18	1	-1	-1	-1	1	0,910	0,001004
19	-1	1	-1	-1	1	0,763	0,000314
20	1	1	-1	-1	1	0,913	0,000079
21	-1	-1	1	-1	1	0,789	0,000571
22	1	-1	1	-1	1	0,899	0,000253
23	-1	1	1	-1	1	0,712	0,000400
24	1	1	1	-1	1	0,873	0,000179
25	-1	-1	-1	1	1	0,761	0,000251
26	1	-1	-1	1	1	0,881	0,000039
27	-1	1	-1	1	1	0,731	0,005000
28	1	1	-1	1	1	0,888	0,001250
29	-1	-1	1	1	1	0,708	0,001275
30	1	-1	1	1	1	0,882	0,001008
31	-1	1	1	1	1	0,637	0,002185
32	1	1	1	1	1	0,849	0,000711

Расчет коэффициентов регрессии

При использовании полного факторного эксперимента с равномерным дублированием опытов уравнение (3.3) перепишем в виде:

$$\begin{aligned}
 Y = & b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + \\
 & b_{14}X_1X_4 + b_{15}X_1X_5 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{25}X_2X_5 + b_{34}X_3X_4 + \quad (3.17) \\
 & b_{35}X_3X_5 + b_{45}X_4X_5 + b_{123}X_1X_2X_3 + b_{124}X_1X_2X_4 + b_{125}X_1X_2X_5 + \\
 & b_{134}X_1X_3X_4 + b_{135}X_1X_3X_5 + b_{145}X_1X_4X_5 + b_{234}X_2X_3X_4 + \\
 & b_{235}X_2X_3X_5 + b_{245}X_2X_4X_5 + b_{345}X_3X_4X_5 + b_{1234}X_1X_2X_3X_4 + \\
 & b_{1235}X_1X_2X_3X_5 + b_{1245}X_1X_2X_4X_5 + b_{1345}X_1X_3X_4X_5 + b_{2345}X_2X_3X_4X_5 + \\
 & b_{12345}X_1X_2X_3X_4X_5
 \end{aligned}$$

Коэффициенты регрессии определяются с использованием следующих зависимостей [3, 4, 72]:

$$b_0 = \frac{\sum_{n=1}^N Y_i}{N}, \quad (3.18)$$

$$b_i = \frac{\sum_{n=1}^N X_i Y_{in}}{N}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.19)$$

Вычисленные по формулам (3.18) и (3.19) коэффициенты регрессии имеют следующие значения:

$b_0 = 0,741$	$b_{14} = 0,011$	$b_{123} = 0,004$	$b_{245} = 0,004$
$b_1 = 0,092$	$b_{15} = -0,017$	$b_{124} = 0,004$	$b_{345} = 0,002$
$b_2 = -0,028$	$b_{23} = -0,007$	$b_{125} = -0,006$	$b_{1234} = 0,002$
$b_3 = -0,022$	$b_{24} = -0,003$	$b_{134} = 0,007$	$b_{1235} = -0,003$
$b_4 = -0,021$	$b_{25} = 0,011$	$b_{135} = 0,001$	$b_{1245} = -0,006$
$b_5 = 0,071$	$b_{34} = -0,006$	$b_{145} = -0,003$	$b_{1345} = -0,001$
$b_{12} = 0,016$	$b_{35} = 0,003$	$b_{234} = -0,002$	$b_{2345} = 0,001$
$b_{13} = 0,007$	$b_{45} = 0,000$	$b_{235} = -0,001$	$b_{12345} = -0,003$

Подставляя полученные значения b_0 и b_i в функцию (3.17), получаем в полном виде:

$$\begin{aligned}
 Y = & 0,741 + 0,092X_1 - 0,028X_2 - 0,022X_3 - 0,021X_4 + 0,071X_5 + 0,016X_1X_2 + 0,007X_1X_3 + \\
 & + 0,011X_1X_4 - 0,017X_1X_5 - 0,007X_2X_3 - 0,003X_2X_4 + 0,011X_2X_5 - 0,006X_3X_4 + 0,003X_3X_5 +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 0X_4X_5 + 0,004X_1X_2X_3 + 0,004X_1X_2X_4 - 0,006X_1X_2X_5 + 0,007X_1X_3X_4 + 0,001X_1X_3X_5 \\
& - 0,003X_1X_4X_5 - 0,002X_2X_3X_4 - 0,001X_2X_3X_5 + 0,004X_2X_4X_5 + 0,002X_3X_4X_5 \\
& + 0,002X_1X_2X_3X_4 - 0,003X_1X_2X_3X_5 - 0,006X_1X_2X_4X_5 - 0,001X_1X_3X_4X_5 + 0,001X_2X_3X_4X_5 \\
& - 0,003X_1X_2X_3X_4X_5
\end{aligned}$$

Поскольку каждый опыт обязательно повторялся дважды ($n=2$), то формула для вычисления дисперсии оценок коэффициентов будет иметь следующий вид [3, 4, 72]:

$$S_{bj}^2 = \frac{S_y^2}{nN} \quad (3.20)$$

Значимыми признаются такие коэффициенты в уравнении регрессии, для которых верно условие [3, 4, 63]:

$$|b_i| \geq t_{\alpha, f_i} S_{bj}, \quad (3.21)$$

где t_{α, f_i} - критерий Стьюдента $t_{\alpha, f_i} = 2,036$; $\alpha = 0,05$ - уровень значимости; $f_1 = 32$ - количество степеней свободы; $S_{bj} = \sqrt{S_{bj}^2}$ - среднеквадратичная ошибка составляет $S_{bj} \approx 0,0123$.

При этих значениях получаем $t_{\alpha, f_i} S_{bj} \approx 0,015$.

Тогда значимыми являются коэффициенты $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_{12}$ и b_{15} .

Уравнение регрессии после процедуры проверки можно записать так:

$$\begin{aligned}
Y = & 0,741 + 0,092X_1 - 0,028X_2 - 0,022X_3 - 0,021X_4 + 0,071X_5 + 0,016X_1X_2 \\
& - 0,017X_1X_5
\end{aligned} \quad (3.22)$$

Проверка адекватности модели

Используя критерий Фишера проверяется адекватность полученного уравнения регрессии [3, 4, 72]:

$$F_{f_1 f_2}^{\text{расч}} = \frac{S_{\text{неадекват}}^2}{S_y^2}, \quad (3.23)$$

где S_y^2 - средняя дисперсия опыта; f_1 - число степеней свободы этих опытов; $S_{\text{неадекват}}^2$ - дисперсия неадекватности; f_2 - число степеней свободы неадекватности.

Таблица 3.4 - Значения отклика

№	Y	$Y_{расч}$	$Y_{расч} - Y$	$(Y_{расч} - Y)^2$
1	0,650	0,648	-0,002	0,000003
2	0,825	0,833	0,008	0,000072
3	0,570	0,560	-0,010	0,000109
4	0,788	0,811	0,023	0,000528
5	0,629	0,603	-0,026	0,000665
6	0,787	0,789	0,002	0,000005
7	0,533	0,515	-0,018	0,000330
8	0,746	0,766	0,020	0,000400
9	0,631	0,607	-0,025	0,000612
10	0,806	0,792	-0,014	0,000207
11	0,519	0,518	-0,001	0,000001
12	0,775	0,769	-0,006	0,000037
13	0,576	0,562	-0,014	0,000197
14	0,764	0,747	-0,017	0,000285
15	0,377	0,473	0,096	0,009190
16	0,741	0,724	-0,016	0,000268
17	0,806	0,826	0,020	0,000395
18	0,910	0,941	0,031	0,000960
19	0,763	0,737	-0,025	0,000638
20	0,913	0,918	0,006	0,000035
21	0,789	0,781	-0,008	0,000067
22	0,899	0,897	-0,002	0,000005
23	0,712	0,693	-0,020	0,000388
24	0,873	0,874	0,001	0,000001
25	0,761	0,784	0,023	0,000532
26	0,881	0,900	0,019	0,000345
27	0,731	0,696	-0,036	0,001268
28	0,888	0,877	-0,011	0,000114
29	0,708	0,740	0,032	0,001005
30	0,882	0,855	-0,027	0,000722
31	0,637	0,651	0,014	0,000200
32	0,849	0,832	-0,017	0,000286

Дисперсия неадекватности определяется по формуле [3, 4, 72]:

$$S_{\text{неадекват}}^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (Y_n^{\text{расч}} - Y_n^{\text{эксп}})^2}{f_2} \quad (3.24)$$

где $Y_n^{\text{расч}}$ - значение отклика в n -ом опыте, рассчитываемое по уравнению регрессии; $Y_n^{\text{эксп}}$ - значение отклика в n -ом опыте, определенное экспериментально (в таблице 3.4).

При этом определение степеней свободы неадекватности определяется как [3, 4, 72]:

$$f_2 = N - k \quad (3.25)$$

где N - количество проведенных опытов, k - число используемых в уравнении коэффициентов.

Поскольку $f_2 = 32 - 8 = 24$, можно вычислить значение $S_{\text{неадекват}}^2 \approx \frac{0,020}{24} = 0,000833$.

Критерий Фишера дает значение $F_{f_1 f_2}^{\text{расч}} \approx 0,085$. Аналогичный расчет при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и степенями свободы $f_1 = 32, f_2 = 24$ составляет $F_{f_1 f_2}^{\text{табл}} = 1,87$. При сравнении полученных величин определяем, что $F_{f_1 f_2}^{\text{расч}} \approx 0,085 < F_{f_1 f_2}^{\text{табл}} = 1,87$. Из этого следует, что гипотеза о адекватности регрессии подтвердилась.

Анализ результатов аналитического моделирования

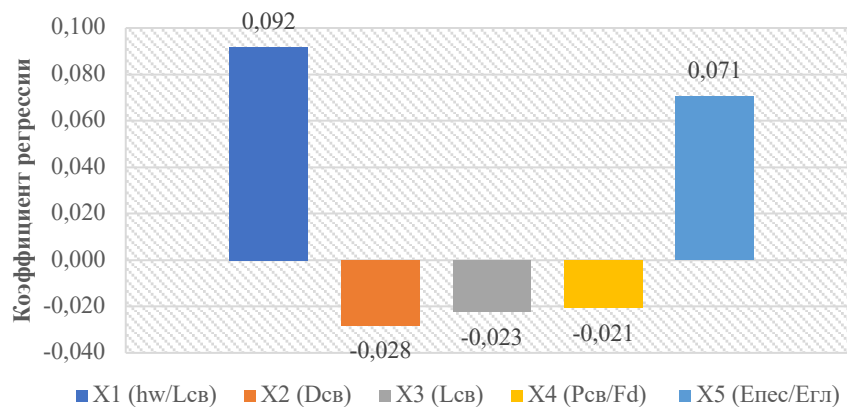


Рисунок 3.1 - Влияние факторов на положение НТ

Полученные результаты позволяют оценить силу влияния факторов на величину отклика, в нашем случае выраженную через положение «нулевой точки».

Значения полученных коэффициентов показывают силу влияния факторов. Чем больше численная величина коэффициента, тем больше его влияние, при этом знак «минус» показывает, что с увеличением кодированного значения фактора величина отклика уменьшается, при знаке «плюс» - величина отклика возрастает.

На рисунке 3.1 представлена диаграмма силы влияния рассмотренных факторов на положение «нулевой точки».

Диаграмма показывает, что наибольшее влияние на глубину расположения «нулевой точки» оказывает нормализованная глубина водопонижения $h_w/L_{св}$ и соотношение модулей деформации грунта под нижним концом сваи и вдоль ее ствола $E_{пес}/E_{гл}$. Диаметр сваи $D_{св}$, ее длина $L_{св}$ 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.

3.3 Одиночная свая без вертикальной нагрузки

Для случая одиночной ненагруженной сваи выполнено математического моделирования 4-х факторной модели (исключен фактор влияния на положение «нулевой точки» нагрузки на сваю $P_{св}/F_d$).

3.3.1 Математическая модель эксперимента

В Таблице 3.5 представлен перечень 4-х учтенных факторов влияния с указанием их интервалов варьирования и уровней значимости.

Таблица 3.5 - Уровни факторов и интервалы их варьирования

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

При использовании полного факторного эксперимента с равномерным дублированием опытов уравнение (3.3) перепишем в виде:

$$\begin{aligned}
Y = & b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 \\
& + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4 + b_{123}X_1X_2X_3 + b_{124}X_1X_2X_4 \\
& + b_{134}X_1X_3X_4 + b_{234}X_2X_3X_4 + b_{1234}X_1X_2X_3X_4
\end{aligned} \quad (3.26)$$

В таблице 3.6 приведена матрица планирования и результаты расчетов для 4 факторов: уровня грунтовых вод $h_w/L_{св}$, диаметра $D_{св}$ и длины сваи $L_{св}$, соотношении модулей деформации грунта под нижним концом сваи и вдоль ее ствола $E_{пес}/E_{гл}$ при уровне нагружения сваи вертикальной нагрузкой $P_{св}/F_d = 0$.

Таблица 3.6 - Матрица планирования и результаты расчетов

	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1 X_2	X_1 X_3	X_1 X_4	X_2 X_3	X_2 X_4	X_3 X_4	X_1 X_2 X_3	X_1 X_2 X_4	X_1 X_3 X_4	X_2 X_3 X_4	X_1 X_2 X_3 X_4	Y
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	0,769
2	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	0,875
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	0,781
4	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0,881
5	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	0,736
6	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	0,829
7	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	0,755
8	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0,849
9	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,881
10	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0,944
11	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	0,856
12	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	0,955
13	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	0,837
14	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	0,916
15	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	0,863
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,929

3.3.2 Оценка параметров модели

Расчет дисперсии опытов

Используя таблицу для критерия Кохрена, при уровне значимости $\alpha = 0,05$,

степени свободы $f_n = 1$ и числе опытов $N=16$ найдем $G_{\text{табл}} \approx 0,4546$. Поскольку $G_{\text{расч}} = \frac{0,004608}{0,16984} \approx 0,271 < G_{\text{табл}} \approx 0,4546$ - ряд дисперсий однородный.

Средняя дисперсия, определенная по формуле (3.14), равна $S_y^2 = \frac{0,16984}{16} = 0,010615$.

Число степеней свободы анализируемого эксперимента $f_1=N(n-1)=16*1=16$.

Таблица 3.7 - Значение дисперсия результатов

	X_1	X_2	X_3	X_4	Y	$S_{\text{уп}}^2$
1	-1	-1	-1	-1	0,769	0,000968
2	1	-1	-1	-1	0,875	0,000968
3	-1	1	-1	-1	0,781	0,000450
4	1	1	-1	-1	0,881	0,000392
5	-1	-1	1	-1	0,736	0,001682
6	1	-1	1	-1	0,829	0,002592
7	-1	1	1	-1	0,755	0,000242
8	1	1	1	-1	0,849	0,000648
9	-1	-1	-1	1	0,881	0,000722
10	1	-1	-1	1	0,944	0,000450
11	-1	1	-1	1	0,856	0,000002
12	1	1	-1	1	0,955	0,001800
13	-1	-1	1	1	0,837	0,004608
14	1	-1	1	1	0,916	0,000722
15	-1	1	1	1	0,863	0,000450
16	1	1	1	1	0,929	0,000288

Расчет коэффициентов регрессии

Вычисленные по формулам (3.18) и (3.19) коэффициенты регрессии имеют следующие значения:

$$\begin{array}{llll}
 b_0 = 0,854 & b_4 = 0,044 & b_{23} = 0,005 & b_{124} = 0,002 \\
 b_1 = 0,044 & b_{12} = 0,001 & b_{24} = -0,002 & b_{134} = 0,000 \\
 b_2 = -0,005 & b_{13} = -0,002 & b_{34} = 0,003 & b_{234} = 0,002 \\
 b_3 = -0,014 & b_{14} = -0,005 & b_{123} = -0,003 & b_{1234} = -0,004
 \end{array}$$

Введя найденные значения b_0 и b_i в функцию (3.17), получаем:

$$Y = 0,854 + 0,044X_1 - 0,005X_2 - 0,014X_3 + 0,044X_4 + 0,001X_1X_2 - 0,002X_1X_3 - 0,005X_1X_4 + 0,005X_2X_3 - 0,002X_2X_4 + 0,003X_3X_4 - 0,003X_1X_2X_3 + 0,002X_1X_2X_4 + 0X_1X_3X_4 + 0,002X_2X_3X_4 - 0,004X_1X_2X_3X_4$$

Используя формулу (3.21), где критерий Стьюдента $t_{\alpha_i, f_i} = 2,12$; $\alpha = 0,05$ - уровень значимости; $f_1 = 16$ - число степеней свободы, получим:

$$t_{\alpha_i, f_i} S_{bj} \approx 0,0122.$$

Тогда значимыми являются коэффициенты b_0 , b_1 , b_3 и b_4 .

Следовательно, уравнение регрессии запишется как:

$$Y = 0,854 + 0,044X_1 - 0,014X_3 + 0,044X_4 \quad (3.27)$$

Проверка адекватности модели

В таблице 3.8 приведены значения отклика в случае $R_{св}/F_d = 0$.

Таблица 3.8 - Значения отклика

	Y	$Y_{расч}$	$Y_{расч} - Y$	$(Y_{расч} - Y)^2$
1	0,769	0,781875	0,013	0,000166
2	0,875	0,881375	0,006	0,000041
3	0,781	0,772875	-0,008	0,000066
4	0,881	0,869875	-0,011	0,000124
5	0,736	0,747625	0,012	0,000135
6	0,829	0,847125	0,018	0,000329
7	0,755	0,738625	-0,016	0,000268
8	0,849	0,835625	-0,013	0,000179
9	0,881	0,878625	-0,002	0,000006
10	0,944	0,949625	0,006	0,000032
11	0,856	0,862625	0,007	0,000044
12	0,955	0,945125	-0,010	0,000098
13	0,837	0,855875	0,019	0,000356
14	0,916	0,926875	0,011	0,000118
15	0,863	0,839875	-0,023	0,000535
16	0,929	0,922375	-0,007	0,000044

$$f_2 = N - k = 16 - 4 = 12$$

Сравнивая значения $F_{f_1f_2}^{\text{расч}}$ и $F_{f_1f_2}^{\text{табл}}$, получим $F_{f_1f_2}^{\text{расч}} \approx 0,199 < F_{f_1f_2}^{\text{табл}} = 2,604$.

Следовательно, гипотеза об адекватности уравнения регрессии верна.

Анализ результатов математического моделирования

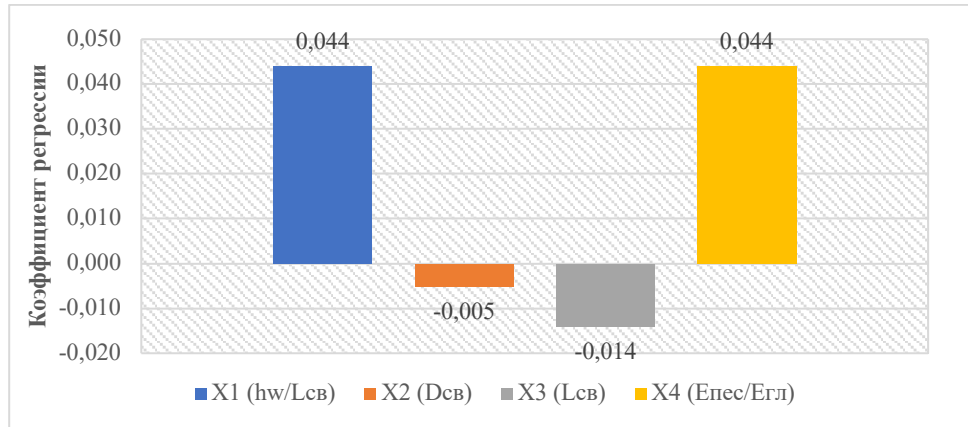


Рисунок 3.2 - Влияние факторов на положение НТ для ненагруженной сваи

На рисунке 3.2 представлена диаграмма силы влияния каждого из 4-х факторов на положение «нулевой точки» для случая ненагруженной сваи.

Диаграмма показывает, что наиболее значимыми факторами, влияющими на глубину расположения «нулевой точки» практически в одинаковой степени, являются, как и в случае с нагруженной вертикальной нагрузкой сваи, глубина водопонижения и модульное соотношение $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}$. Диаметр сваи $D_{\text{св}}$ и ее длина $L_{\text{св}}$ оказывают существенно меньшее влияние на глубину расположения «нулевой точки», но в то же время достаточное для их обязательного учета в расчетах.

3.4 Одиночная свая с вертикальной нагрузкой (4-х факторный анализ)

Необходимость выполнения 4-х факторного анализа для нагруженной сваи вызвана возможностью представить решения полученных уравнений регрессии в графическом виде, существенно упрощающем процедуру расчетов.

Ниже приведены результаты математического моделирования 4-х факторной модели, выполненного для четырех значений $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 1; 2; 3; 4$.

3.4.1 Математическая модель эксперимента ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 1$)

Перечень четырех выбранных факторов влияния с указанием их уровней и

3.4.2 Оценка параметров модели ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 1$)

Расчет дисперсии опытов

Есть $f_n = 1$. Используя таблицу для критерий Кохрена, при уровне значимости $\alpha = 0,05$, степени свободы $f_n = 1$ и числе опытов $N=16$ найдем $G_{\text{табл}} \approx 0,4546$. Поскольку $G_{\text{расч}} = \frac{0,004050}{0,009884} \approx 0,4097 < G_{\text{табл}} \approx 0,4546$ - ряд дисперсий однородный.

Средняя дисперсия, определенная по формуле (3.14), равна $S_y^2 = \frac{0,009884}{16} = 0,000618$.

Число степеней свободы анализируемого эксперимента $f_1=N(n-1)=16*1=16$.

Значения дисперсии результатов приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 - Значения дисперсии результатов ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 1$)

	X_1	X_2	X_3	X_4	Y	$S_{\text{уп}}^2$
1	-1	-1	-1	-1	0,650	0,000072
2	1	-1	-1	-1	0,825	0,000288
3	-1	1	-1	-1	0,570	0,004050
4	1	1	-1	-1	0,788	0,000098
5	-1	-1	1	-1	0,629	0,001058
6	1	-1	1	-1	0,787	0,000008
7	-1	1	1	-1	0,533	0,000072
8	1	1	1	-1	0,764	0,001250
9	-1	-1	-1	1	0,631	0,000200
10	1	-1	-1	1	0,806	0,000002
11	-1	1	-1	1	0,519	0,002312
12	1	1	-1	1	0,775	0,000032
13	-1	-1	1	1	0,576	0,000392
14	1	-1	1	1	0,764	0,000018
15	-1	1	1	1	0,377	0,000000
16	1	1	1	1	0,741	0,000032

Расчет коэффициентов регрессии

Вычисленные по формулам (3.18) и (3.19) коэффициенты регрессии имеют

следующие значения:

$$\begin{array}{llll}
 b_0 = 0,671 & b_4 = -0,022 & b_{23} = -0,005 & b_{124} = 0,009 \\
 b_1 = 0,110 & b_{12} = 0,023 & b_{24} = -0,008 & b_{134} = 0,008 \\
 b_2 = -0,038 & b_{13} = 0,007 & b_{34} = -0,010 & b_{234} = -0,005 \\
 b_3 = -0,025 & b_{14} = 0,013 & b_{123} = 0,008 & b_{1234} = 0,004
 \end{array}$$

Подставляем их значения b_0 и b_i в функцию (3.17), получаем ее в полном виде:

$$\begin{aligned}
 Y = & 0,671 + 0,11X_1 - 0,038X_2 - 0,025X_3 - 0,022X_4 + 0,023X_1X_2 + 0,007X_1X_3 + 0,013X_1X_4 \\
 & - 0,005X_2X_3 - 0,008X_2X_4 - 0,01X_3X_4 + 0,008X_1X_2X_3 + 0,009X_1X_2X_4 + 0,008X_1X_3X_4 \\
 & - 0,005X_2X_3X_4 + 0,004X_1X_2X_3X_4
 \end{aligned}$$

Используя формулу (3.21), где критерий Стьюдента $t_{\alpha,fi} = 2,12$; $\alpha = 0,05$ - уровень значимости; $f_1 = 16$ - число степеней свободы, получаем:

$$t_{\alpha,fi}S_{bj} \approx 0,009.$$

Тогда значимыми являются коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_{12} , b_{14} , b_{34} и b_{124} .

Следовательно, уравнение регрессии при $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}=1$ выражается формулой:

$$\begin{aligned}
 Y = & 0,671 + 0,11X_1 - 0,038X_2 - 0,025X_3 - 0,022X_4 + 0,023X_1X_2 + 0,013X_1X_4 \\
 & - 0,01X_3X_4 + 0,009X_1X_2X_4
 \end{aligned} \quad (3.28)$$

Проверка адекватности модели

В таблице 3.12 приведены значения откликов в случае $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 1$.

Таблица 3.12 - Значения откликов ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 1$)

	Y	$Y_{\text{расч}}$	$Y_{\text{расч}} - Y$	$(Y_{\text{расч}} - Y)^2$
1	0,650	0,662563	0,013	0,000158
2	0,825	0,829063	0,004	0,000017
3	0,570	0,558438	-0,012	0,000134
4	0,788	0,782938	-0,005	0,000026
5	0,629	0,632563	0,004	0,000013
6	0,787	0,799063	0,012	0,000146
7	0,533	0,528438	-0,005	0,000021
8	0,764	0,752938	-0,011	0,000122
9	0,631	0,629563	-0,001	0,000002
10	0,806	0,811063	0,005	0,000026
11	0,519	0,490188	-0,029	0,000830
12	0,775	0,800188	0,025	0,000634
13	0,576	0,561313	-0,015	0,000216
14	0,764	0,742813	-0,021	0,000449
15	0,377	0,421938	0,045	0,002019
16	0,741	0,731938	-0,009	0,000082

$$f_2 = N - k = 16 - 9 = 7$$

Сравнивая значения $F_{f_1 f_2}^{\text{расч}}$ и $F_{f_1 f_2}^{\text{табл}}$, получим $F_{f_1 f_2}^{\text{расч}} \approx 1,132 < F_{f_1 f_2}^{\text{табл}} = 3,496$.

Следовательно, гипотеза об адекватности уравнения регрессии верна.

Анализ результатов математического моделирования ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 1$)

На рисунке 3.3 представлена диаграмма, отражающая силу влияния каждого из 4-х рассмотренных факторов на положение «нулевой точки» в случае $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}=1$.

Диаграмма показывает, что основным фактором, влияющим на положение «нулевой точки» при неизменном модульном соотношении $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}$, является уровень понижения подземных вод. Диаметр сваи, ее длина и внешняя вертикальная нагрузка оказывают существенно меньшее влияние на глубину расположения «нулевой точки», оставаясь при этом значимыми.

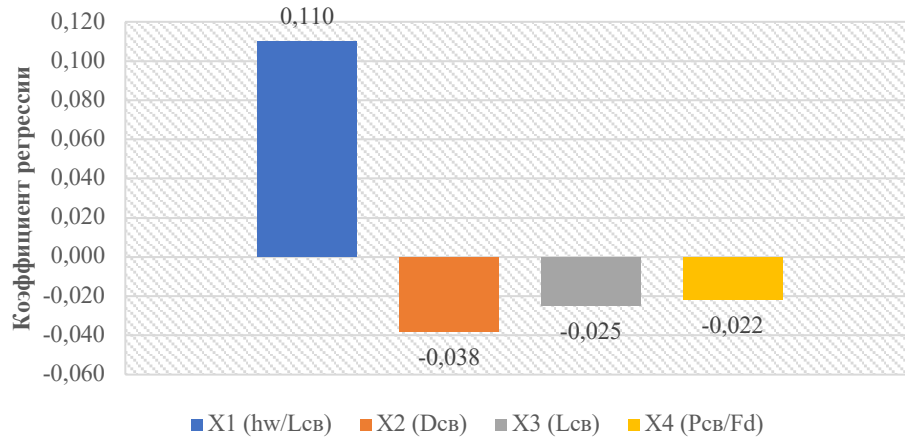


Рисунок 3.3 - Влияние факторов на положение НТ при $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 1$

3.4.3 Математическая модель эксперимента (при $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 2$)

Таблица 3.13 - Матрица планирования и результаты расчетов ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 2$)

	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1 X_2	X_1 X_3	X_1 X_4	X_2 X_3	X_2 X_4	X_3 X_4	X_1 X_2 X_3 X_4	X_1 X_2 X_3 X_4	X_1 X_2 X_3 X_4	X_2 X_3 X_4	X_1 X_2 X_3 X_4	Y
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	0,724
2	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	0,869
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	0,669
4	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0,863
5	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	0,708
6	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	0,846
7	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	0,623
8	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0,816
9	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,687
10	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0,847
11	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	0,619
12	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	0,838
13	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	0,626
14	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	0,826
15	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	0,571
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,783

Учитываемые факторы 4-х факторной математической модели с указанием

их уровней и интервалов варьирования представлен в таблице 3.9.

В таблице 3.13 приведена матрица планирования и результаты расчетов для следующих факторов: уровня грунтовых вод $h_w/L_{св}$, диаметра $D_{св}$ и длины сваи $L_{св}$, уровня нагружения сваи вертикальной нагрузкой $P_{св}$ при соотношении модулей деформации грунта вдоль ствола сваи и под ее нижним концом $E_{пес}/E_{гл}=2$. Затем в таблице 3.14 приведены значения дисперсия результатов.

3.4.4 Оценка параметров модели ($E_{пес}/E_{гл} = 2$)

Расчет дисперсии опытов

Таблица 3.14 - Значения дисперсии результатов ($E_{пес}/E_{гл} = 2$)

	X_1	X_2	X_3	X_4	Y	$S_{уп}^2$
1	-1	-1	-1	-1	0,724	0,001152
2	1	-1	-1	-1	0,869	0,000722
3	-1	1	-1	-1	0,669	0,003872
4	1	1	-1	-1	0,863	0,000098
5	-1	-1	1	-1	0,708	0,000968
6	1	-1	1	-1	0,846	0,000018
7	-1	1	1	-1	0,623	0,000578
8	1	1	1	-1	0,816	0,000338
9	-1	-1	-1	1	0,687	0,003362
10	1	-1	-1	1	0,847	0,000968
11	-1	1	-1	1	0,619	0,001800
12	1	1	-1	1	0,838	0,000008
13	-1	-1	1	1	0,626	0,000882
14	1	-1	1	1	0,826	0,000050
15	-1	1	1	1	0,571	0,004418
16	1	1	1	1	0,783	0,000392

Используя таблицу Кохрена, при уровне значимости $\alpha = 0,05$, степени свободы $f_n = 1$ и числе опытов $N=16$ найдем $G_{табл} \approx 0,4546$. Поскольку $G_{расч} =$

$$\frac{0,003872}{0,019626} \approx 0,1973 < G_{табл} \approx 0,4546 - \text{ряд дисперсий однородный.}$$

Средняя дисперсия, определенная по формуле (3.14), равна $S_y^2 = \frac{0,019626}{16} = 0,001227$.

Число степеней свободы анализируемого эксперимента $f_1 = N(n-1) = 16 \cdot 1 = 16$.

Расчет коэффициентов регрессии

Вычисленные по формулам (3.18) и (3.19) коэффициенты регрессии имеют следующие значения:

$$\begin{array}{llll}
 b_0 = 0,745 & b_4 = -0,020 & b_{23} = -0,005 & b_{124} = -0,002 \\
 b_1 = 0,091 & b_{12} = 0,011 & b_{24} = 0,000 & b_{134} = 0,003 \\
 b_2 = -0,022 & b_{13} = 0,002 & b_{34} = -0,003 & b_{234} = 0,002 \\
 b_3 = -0,020 & b_{14} = 0,008 & b_{123} = -0,003 & b_{1234} = -0,003
 \end{array}$$

Подставляя значения b_0 и b_i в функцию (3.17), получаем ее в полном виде:

$$\begin{aligned}
 Y = & 0,745 + 0,091X_1 - 0,022X_2 - 0,02X_3 - 0,02X_4 + 0,011X_1X_2 + 0,002X_1X_3 + 0,008X_1X_4 \\
 & - 0,005X_2X_3 + 0X_2X_4 - 0,003X_3X_4 - 0,003X_1X_2X_3 - 0,002X_1X_2X_4 + 0,003X_1X_3X_4 \\
 & + 0,002X_2X_3X_4 - 0,003X_1X_2X_3X_4
 \end{aligned}$$

Используя формулу (3.21), где критерий Стьюдента $t_{\alpha i, f_1} = 2,12$; $\alpha = 0,05$ - уровень значимости; $f_1 = 16$ - число степеней свободы, получим

$$t_{\alpha i, f_1} S_{bj} \approx 0,013.$$

Отсюда значимыми являются коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 , b_3 и b_4 .

Следовательно, уравнение регрессии при $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}=2$ имеет вид:

$$Y = 0,745 + 0,091X_1 - 0,022X_2 - 0,02X_3 - 0,02X_4 \quad (3.29)$$

Проверка адекватности модели

В таблице 3.15 приведены значения отклика для случае $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 2$.

Таблица 3.15 - Значения отклика ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 2$)

	Y	$Y_{\text{расч}}$	$Y_{\text{расч}} - Y$	$(Y_{\text{расч}} - Y)^2$
1	0,724	0,732438	0,008	0,000071
2	0,869	0,873938	0,005	0,000024
3	0,669	0,662563	-0,006	0,000041
4	0,863	0,856063	-0,007	0,000048
5	0,708	0,699438	-0,009	0,000073
6	0,846	0,840938	-0,005	0,000026
7	0,623	0,629563	0,007	0,000043
8	0,816	0,823063	0,007	0,000050
9	0,687	0,679688	-0,007	0,000053
10	0,847	0,859688	0,013	0,000161
11	0,619	0,618063	-0,001	0,000001
12	0,838	0,833563	-0,004	0,000020
13	0,626	0,633438	0,007	0,000055
14	0,826	0,813438	-0,013	0,000158
15	0,571	0,571813	0,001	0,000001
16	0,783	0,787313	0,004	0,000019

$$f_2 = N - k = 16 - 5 = 11$$

Сравнивая значения $F_{f_1 f_2}^{\text{расч}}$ и $F_{f_1 f_2}^{\text{табл}}$, получим $F_{f_1 f_2}^{\text{расч}} \approx 0,0626 < F_{f_1 f_2}^{\text{табл}} = 2,706$.

Следовательно, гипотеза об адекватности уравнения регрессии верна.

Анализ результатов математического моделирования ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 2$)

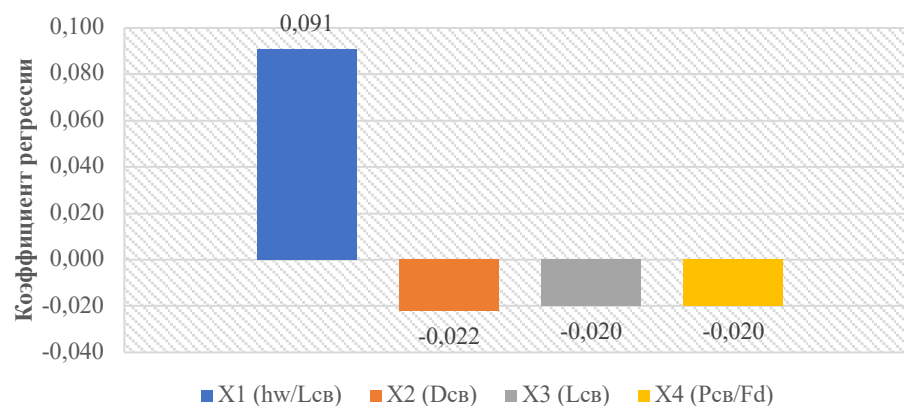


Рисунок 3.4 - Влияние факторов на положение НТ при $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 2$

На рисунке 3.4 представлена диаграмма, отражающая степень влияния

каждого из 4-х рассмотренных факторов на положение «нулевой точки» в случае $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 2$.

Диаграмма показывает, что основным фактором, влияющим на положение «нулевой точки» при неизменном модульном соотношении $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}$ является уровень понижения подземных вод. Диаметр сваи, ее длина и внешняя вертикальная нагрузка, оставаясь значимыми факторами, оказывают существенно меньшее влияние на глубину расположения «нулевой точки», при этом их сила несколько увеличивается по сравнению с предыдущим случаем ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 1$).

3.4.5 Математическая модель эксперимента ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 3$)

Таблица 3.16 - Матрица планирования и результаты расчетов ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 3$)

	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1 X_2	X_1 X_3	X_1 X_4	X_2 X_3	X_2 X_4	X_3 X_4	X_1 X_2 X_3 X_4	X_1 X_2 X_3 X_4	X_1 X_2 X_3 X_4	X_2 X_3 X_4	X_1 X_2 X_3 X_4	Y
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	0,788
2	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	0,894
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	0,731
4	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0,894
5	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	0,756
6	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	0,876
7	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	0,665
8	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0,849
9	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,750
10	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0,877
11	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	0,681
12	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	0,863
13	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	0,683
14	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	0,860
15	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	0,604
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,830

Перечень рассмотренных факторов с указанием их уровней и интервалов

варьирования представлен в таблице 3.9.

В таблице 3.16 приведена матрица планирования и результаты расчетов для 4-х факторов: уровня грунтовых вод $h_w/L_{св}$, диаметра $D_{св}$ и длины сваи $L_{св}$, уровня нагружения сваи вертикальной нагрузкой $P_{св}$ при соотношении модулей деформации грунта под нижним концом сваи и вдоль ее ствола $E_{пес}/E_{гл}=3$. Затем в таблице 3.17 приведены значения дисперсии результатов.

3.4.6 Оценка параметров модели (при $E_{пес}/E_{гл} = 3$)

Расчет дисперсии опытов

Таблица 3.17 - Значения дисперсии результатов ($E_{пес}/E_{гл} = 3$)

	X_1	X_2	X_3	X_4	Y	$S_{уп}^2$
1	-1	-1	-1	-1	0,788	0,000098
2	1	-1	-1	-1	0,894	0,000338
3	-1	1	-1	-1	0,731	0,001922
4	1	1	-1	-1	0,894	0,000000
5	-1	-1	1	-1	0,756	0,000512
6	1	-1	1	-1	0,876	0,000050
7	-1	1	1	-1	0,665	0,000050
8	1	1	1	-1	0,849	0,000018
9	-1	-1	-1	1	0,750	0,000968
10	1	-1	-1	1	0,877	0,000242
11	-1	1	-1	1	0,681	0,002738
12	1	1	-1	1	0,863	0,000450
13	-1	-1	1	1	0,683	0,005618
14	1	-1	1	1	0,860	0,000128
15	-1	1	1	1	0,604	0,003528
16	1	1	1	1	0,830	0,000200

Используя таблицу критериев Кохрена, при уровне значимости $\alpha = 0,05$, степени свободы $f_n = 1$ и числе опытов $N=16$ найдем $G_{табл} \approx 0,4546$. Поскольку

$$G_{расч} = \frac{0,001922}{0,016860} \approx 0,1140 < G_{табл} \approx 0,4546 - \text{ряд дисперсий однородный.}$$

Средняя дисперсия, определенная по формуле (3.14), равна $S_y^2 = \frac{0,016860}{16} = 0,001054$.

Число степеней свободы анализируемого эксперимента $f_1 = N(n-1) = 16 \cdot 1 = 16$.

Расчет коэффициентов регрессии

Вычисленные по формулам (3.18) и (3.19) коэффициенты регрессии имеют следующие значения:

$$\begin{array}{llll}
 b_0 = 0,788 & b_4 = -0,019 & b_{23} = -0,005 & b_{124} = -0,001 \\
 b_1 = 0,080 & b_{12} = 0,014 & b_{24} = -0,001 & b_{134} = 0,004 \\
 b_2 = -0,023 & b_{13} = 0,008 & b_{34} = -0,002 & b_{234} = 0,002 \\
 b_3 = -0,022 & b_{14} = 0,009 & b_{123} = 0,000 & b_{1234} = -0,001
 \end{array}$$

Подставляя значения b_0 и b_i в функцию (3.17), получаем ее в полном виде:

$$\begin{aligned}
 Y = & 0,788 + 0,08X_1 - 0,023X_2 - 0,022X_3 - 0,019X_4 + 0,014X_1X_2 + 0,008X_1X_3 + 0,009X_1X_4 \\
 & - 0,005X_2X_3 - 0,001X_2X_4 - 0,002X_3X_4 + 0X_1X_2X_3 - 0,001X_1X_2X_4 + 0,004X_1X_3X_4 \\
 & + 0,002X_2X_3X_4 - 0,001X_1X_2X_3X_4
 \end{aligned}$$

Используя формулу (3.21), где критерий Стьюдента $t_{\alpha i, f_1} = 2,12$; $\alpha = 0,05$ - уровень значимости; $f_1 = 16$ - число степеней свободы, получим:

$$t_{\alpha i, f_1} S_{bj} \approx 0,012.$$

Тогда значимыми являются коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 и b_{12} .

Отсюда уравнение регрессии при $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}=3$ запишется как:

$$Y = 0,788 + 0,08X_1 - 0,023X_2 - 0,022X_3 - 0,019X_4 + 0,014X_1X_2 \quad (3.30)$$

Проверка адекватности модели

В таблице 3.18 приведены значения отклика в случае $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 3$.

Таблица 3.18 - Значения отклика ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 3$)

	Y	$Y_{\text{расч}}$	$Y_{\text{расч}} - Y$	$(Y_{\text{расч}} - Y)^2$
1	0,788	0,793188	0,005	0,000027
2	0,894	0,906188	0,012	0,000149
3	0,731	0,717063	-0,014	0,000194
4	0,894	0,890563	-0,003	0,000012
5	0,756	0,752938	-0,003	0,000009
6	0,876	0,865938	-0,010	0,000101
7	0,665	0,676813	0,012	0,000140
8	0,849	0,850313	0,001	0,000002
9	0,750	0,739688	-0,010	0,000106
10	0,877	0,891688	0,015	0,000216
11	0,681	0,667813	-0,013	0,000174
12	0,863	0,871813	0,009	0,000078
13	0,683	0,691188	0,008	0,000067
14	0,860	0,843188	-0,017	0,000283
15	0,604	0,619313	0,015	0,000234
16	0,830	0,823313	-0,007	0,000045

$$f_2 = N - k = 16 - 6 = 10$$

Сравнивая значения $F_{f_1 f_2}^{\text{расч}}$ и $F_{f_1 f_2}^{\text{табл}}$, получим $F_{f_1 f_2}^{\text{расч}} \approx 0,174 < F_{f_1 f_2}^{\text{табл}} = 2,834$.

Следовательно, гипотеза об адекватности уравнения регрессии верна.

Анализ результатов математического моделирования ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 3$)

На рисунке 3.5 представлена диаграмма, отражающая степень влияния каждого из 4-х рассмотренных факторов на положение «нулевой точки» в случае $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 3$.

Диаграмма показывает, что основным фактором, влияющим на положение «нулевой точки» при неизменном модульном соотношении $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}$ является уровень понижения подземных вод. Диаметр сваи, ее длина и внешняя вертикальная нагрузка, оставаясь значимыми факторами, оказывают существенно меньшее влияние на глубину расположения «нулевой точки» и должны учитываться в расчетах.

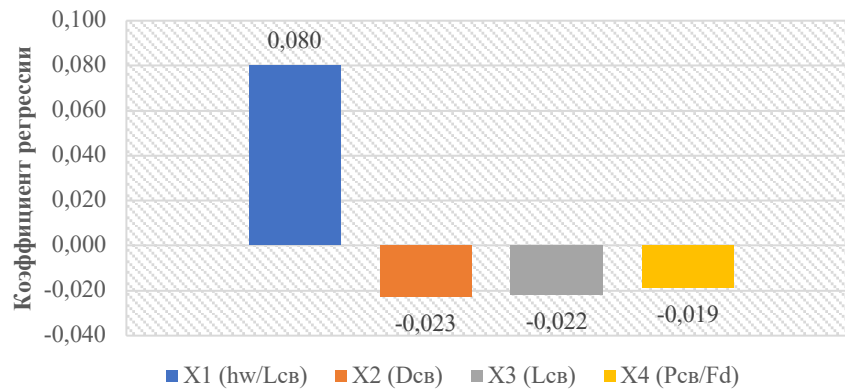


Рисунок 3.5 - Влияние факторов на положение НТ ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 3$)

3.4.7 Математическая модель эксперимента при $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 4$

Таблица 3.19 - Матрица планирования и результаты расчетов ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 4$)

	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1 X_2	X_1 X_3	X_1 X_4	X_2 X_3	X_2 X_4	X_3 X_4	X_1 X_2 X_3 X_4	X_1 X_2 X_3 X_4	X_1 X_2 X_3 X_4	X_2 X_3 X_4	X_1 X_2 X_3 X_4	Y
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	0,806
2	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	0,910
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	0,763
4	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0,913
5	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	0,789
6	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	0,899
7	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	0,712
8	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0,873
9	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,761
10	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0,881
11	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	0,731
12	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	0,888
13	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	0,708
14	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	0,882
15	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	0,637
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,849

Перечень факторов с указанием их уровней и интервалов варьирования представлен в таблице 3.9.

В таблице 3.19 приведена матрица планирования и результаты расчетов для 4-х, указанных в таблице 3.9 факторов, при $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 4$.

3.4.8 Оценка параметров модели ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 4$)

Расчет дисперсии опытов

Используя таблицу критериев Кохрена, при уровне значимости $\alpha = 0,05$, степени свободы $f_n = 1$ и числе опытов $N=16$ находим: $G_{\text{табл}} \approx 0,4546$.

Поскольку $G_{\text{расч}} = \frac{0,003362}{0,011310} \approx 0,2973 < G_{\text{табл}} \approx 0,4546$ - ряд дисперсий однородный.

Средняя дисперсия, определенная по формуле (3.14), равна $S_y^2 = \frac{0,011310}{16} = 0,000707$.

Число степеней свободы анализируемого эксперимента $f_1=N(n-1)=16*1=16$.

Таблица 3.20 - Значение дисперсия результатов ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 4$)

	X_1	X_2	X_3	X_4	Y	$S_{\text{уп}}^2$
1	-1	-1	-1	-1	0,806	0,003362
2	1	-1	-1	-1	0,910	0,000968
3	-1	1	-1	-1	0,763	0,000338
4	1	1	-1	-1	0,913	0,000098
5	-1	-1	1	-1	0,789	0,001352
6	1	-1	1	-1	0,899	0,000008
7	-1	1	1	-1	0,712	0,000242
8	1	1	1	-1	0,873	0,000450
9	-1	-1	-1	1	0,761	0,000450
10	1	-1	-1	1	0,881	0,000032
11	-1	1	-1	1	0,731	0,000032
12	1	1	-1	1	0,888	0,000242
13	-1	-1	1	1	0,708	0,000072
14	1	-1	1	1	0,882	0,000072
15	-1	1	1	1	0,637	0,003200
16	1	1	1	1	0,849	0,000392

Расчет коэффициентов регрессии

Вычисленные по формулам (3.18) и (3.19) коэффициенты регрессии имеют следующие значения:

$$\begin{array}{llll}
 b_0 = 0,813 & b_4 = -0,021 & b_{23} = -0,009 & b_{124} = -0,001 \\
 b_1 = 0,074 & b_{12} = 0,011 & b_{24} = 0,001 & b_{134} = 0,006 \\
 b_2 = -0,017 & b_{13} = 0,008 & b_{34} = -0,004 & b_{234} = -0,001 \\
 b_3 = -0,019 & b_{14} = 0,009 & b_{123} = 0,000 & b_{1234} = 0,000
 \end{array}$$

Подставляя найденные значения b_0 и b_i в функцию (3.17), получаем:

$$\begin{aligned}
 Y = & 0,813 + 0,074X_1 - 0,017X_2 - 0,019X_3 - 0,021X_4 + 0,011X_1X_2 + 0,008X_1X_3 + \\
 & 0,009X_1X_4 - 0,009X_2X_3 + 0,001X_2X_4 - 0,004X_3X_4 + 0X_1X_2X_3 - 0,001X_1X_2X_4 + \\
 & 0,006X_1X_3X_4 - 0,001X_2X_3X_4 + 0X_1X_2X_3X_4
 \end{aligned}$$

Используя формулу (3.21), где критерий Стьюдента $t_{\alpha i, f_i} = 2,12$; $\alpha = 0,05$ - уровень значимости; $f_1 = 16$ - число степеней свободы, получаем:

$$t_{\alpha i, f_i} S_{bj} \approx 0,010.$$

Тогда значимыми являются коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 и b_{12} .

С учетом этого уравнение регрессии при $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}=4$ принимает вид:

$$Y = 0,813 + 0,074X_1 - 0,017X_2 - 0,019X_3 - 0,021X_4 + 0,011X_1X_2 \quad (3.31)$$

Проверка адекватности модели

В таблице 3.21 приведены значения отклика в случае $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 4$.

Таблица 3.21 - Значения отклика ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 4$)

	Y	$Y_{\text{расч}}$	$Y_{\text{расч}} - Y$	$(Y_{\text{расч}} - Y)^2$
1	0,806	0,811375	0,005	0,000029
2	0,910	0,918375	0,008	0,000070
3	0,763	0,753375	-0,010	0,000093
4	0,913	0,908875	-0,004	0,000017
5	0,789	0,781625	-0,007	0,000054
6	0,899	0,888625	-0,010	0,000108
7	0,712	0,723625	0,012	0,000135
8	0,873	0,879125	0,006	0,000038
9	0,761	0,758625	-0,002	0,000006
10	0,881	0,905625	0,025	0,000606
11	0,731	0,706125	-0,025	0,000619
12	0,888	0,890625	0,003	0,000007
13	0,708	0,712375	0,004	0,000019
14	0,882	0,859375	-0,023	0,000512
15	0,637	0,659875	0,023	0,000523
16	0,849	0,844375	-0,005	0,000021

$$f_2 = N - k = 16 - 6 = 10$$

Сравнивая значения $F_{f_1 f_2}^{\text{расч}}$ и $F_{f_1 f_2}^{\text{табл}}$, получим $F_{f_1 f_2}^{\text{расч}} \approx 0,404 < F_{f_1 f_2}^{\text{табл}} = 2,834$, следовательно гипотеза об адекватности уравнения регрессии верна.

Анализ результатов математического моделирования ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 4$)

На рисунке 3.6 представлена диаграмма, отражающая степень влияния каждого из 4-х рассмотренных факторов на положение «нулевой точки» в случае $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 4$.

Диаграмма показывает, что основным фактором, влияющим на положение «нулевой точки» при модульном соотношении $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 4$, является, как и при других рассмотренных выше его значениях, уровень понижения подземных вод. Диаметр сваи, ее длина и внешняя вертикальная нагрузка, оставаясь значимыми

факторами, оказывают существенно меньшее влияние на глубину расположения «нулевой точки» и должны учитываться в расчетах.

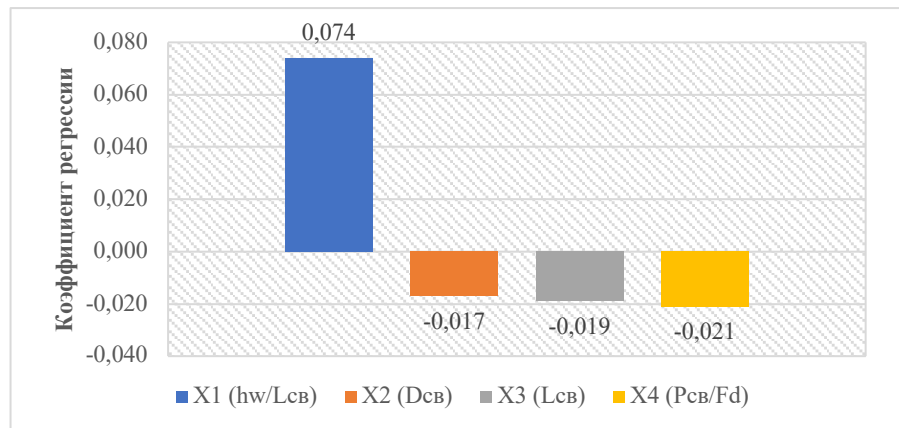


Рисунок 3.6 - Влияние факторов на положение НТ при $E_{пес}/E_{гл} = 4$

Выводы по главе 3

1. Анализ полученных математическим моделированием зависимостей глубины расположения нулевой точки, определяющей степень влияния понижения уровня подземных вод на развитие сил отрицательного трения по боковой поверхности буровой сваи в слабых глинистых грунтах, от различных факторов показал следующее:

- все рассмотренные в эксперименте факторы, к которым относятся: уровень водопонижения, длина сваи, диаметр сваи, вертикальная нагрузка на сваю и жесткость грунта под нижним концом сваи, являются значимыми и должны учитываться в расчетах;

- наиболее значимым фактором является глубина водопонижения и жесткость грунта под нижним концом сваи, остальные из рассмотренных факторов оказывают существенно меньшее влияние, но их учет позволяет повысить точность расчета по определению глубины расположения нулевой точки;

- по мере увеличения глубины водопонижения влияние грунтовых условий, уровня нагружения сваи, а также ее длины и диаметра, на местоположение «нулевой точки» существенно снижается;

- результаты численного и математического моделирования хорошо коррелируют между собой, что говорит о правильности выбора границ математического моделирования.

2. Расчеты проведенные с использованием теории планирования эксперимента позволили получить описанные полиномом функции отклика, определить их область применения, а сопоставление полученных результатов с данными численного моделирования показали их удовлетворительную сходимость в границах варьирования рассматриваемых факторов.

3. 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 определения несущей способности буровых свай в слабых глинистых грунтах при развитии сил отрицательного трения по боковой поверхности, вызванных понижением уровня подземных вод.

ГЛАВА 4: ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАИ С УЧЕТОМ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ТРЕНИЯ, ВЫЗВАННОГО Понижением УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

4.1 Определение несущей способности сваи

Несущая способность сваи, работающей в условиях оседающей грунтовой толщи, вызванных понижением уровня подземных вод, определяется по известной формуле (7.8) СП 24.13330.2011 [52], которую при наличии сил отрицательного трения можно представить в виде (Б.И.Далматов [12]):

$$F_d^* = \gamma_c [\gamma_{cR} R A + \gamma_{cf} u (\sum_{z=z_0}^{z=L_{св}} f_i h_i - \sum_{z=0}^{z=z_0} f_{i,отр} h_i)], \quad (4.1)$$

где γ_c - коэффициент условий работы сваи в грунте; γ_{cR} и γ_{cf} - коэффициенты условий работы грунта соответственно под нижним концом и на боковой поверхности сваи; A - площадь поперечного сечения сваи; u - периметр сваи; $L_{св}$ - длина сваи; h_i - толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи; z_0 - глубина расположения «нулевой точки»; R - расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, определяемое в соответствии с указаниями п.п. 7.2.7 СП 24.13330.2011 [52]; f_i - расчетное сопротивление i -го слоя грунта основания на боковой поверхности сваи, принимаемое по таблице 7.3 СП 24.13330.2011 [52].

Ключевым моментом, от которого существенным образом зависит точность расчета несущей способности сваи по формуле (4.1), является правильность определения глубины расположения «нулевой точки» z_0 .

Полученное в результате математического моделирования уравнение регрессии (3.22) позволяет определить относительную (нормализованную) глубину расположения нейтральной плоскости $z_0/L_{св}$ в зависимости от пяти факторов: относительной глубины понижения уровня подземных вод $h_w/L_{св}$, геометрических размеров сваи (диаметр $D_{св}$ и длина $L_{св}$), уровня нагружения сваи, характеризующегося отношением $P_{св}/F_d$, 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 расчетов, 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 $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 1, 2, 3, 4$, используя которые можно интерполяцией определить относительную глубину расположения нейтральной плоскости $z_0/L_{\text{св}}$ для любого значения отношения $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}$ по двум ближайшим значениям $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}$, найденным по номограммам, как это будет показано в конце главы.

Возможность интерполяции подтверждают приведенные на Рисунке 4.1 графики зависимости $z_0/L_{\text{св}} = f(E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}})$ для различных значений $h_w/L_{\text{св}}$, $D_{\text{св}}$, $L_{\text{св}}$ и $R_{\text{св}}/F_d$, которые показывают, что во всех представленных на графиках случаях между двумя ближайшими точками их можно рассматривать как прямые отрезки, как это делается при определении коэффициента сжимаемости грунта по результатам компрессионных испытаний.

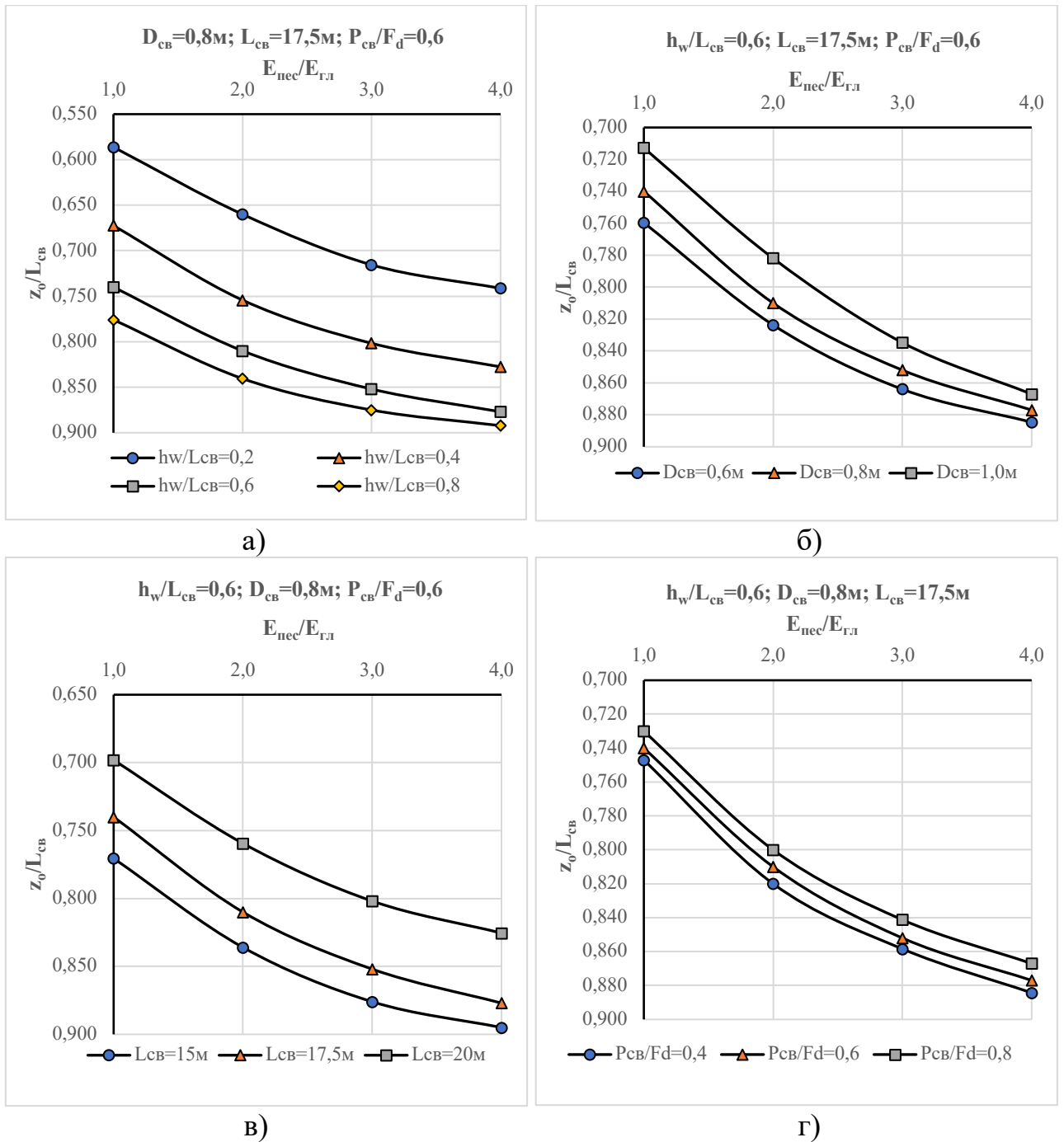


Рисунок 4.1 – Графики зависимости $z_0/L_{cb} = f(E_{пес}/E_{гл})$:

- а) для различных значений h_w/L_{cb} ; б) для различных значений D_{cb} ;
 в) для различных значений L_{cb} ; г) для различных значений P_{cb}/F_d

Возможен и другой вариант, который заключается в аппроксимации полученных экспериментальных зависимостей $z_0/L_{cb} = f(E_{пес}/E_{гл})$ линейной функцией, записанной в виде уравнения $y=ax+b$, коэффициенты которой определяются с использованием метода наименьших квадратов, суть которого

заключается в поиске такой функции, которая имеет минимальную величину суммы квадратов отклонений от экспериментальных значений (Рисунок 4.2).

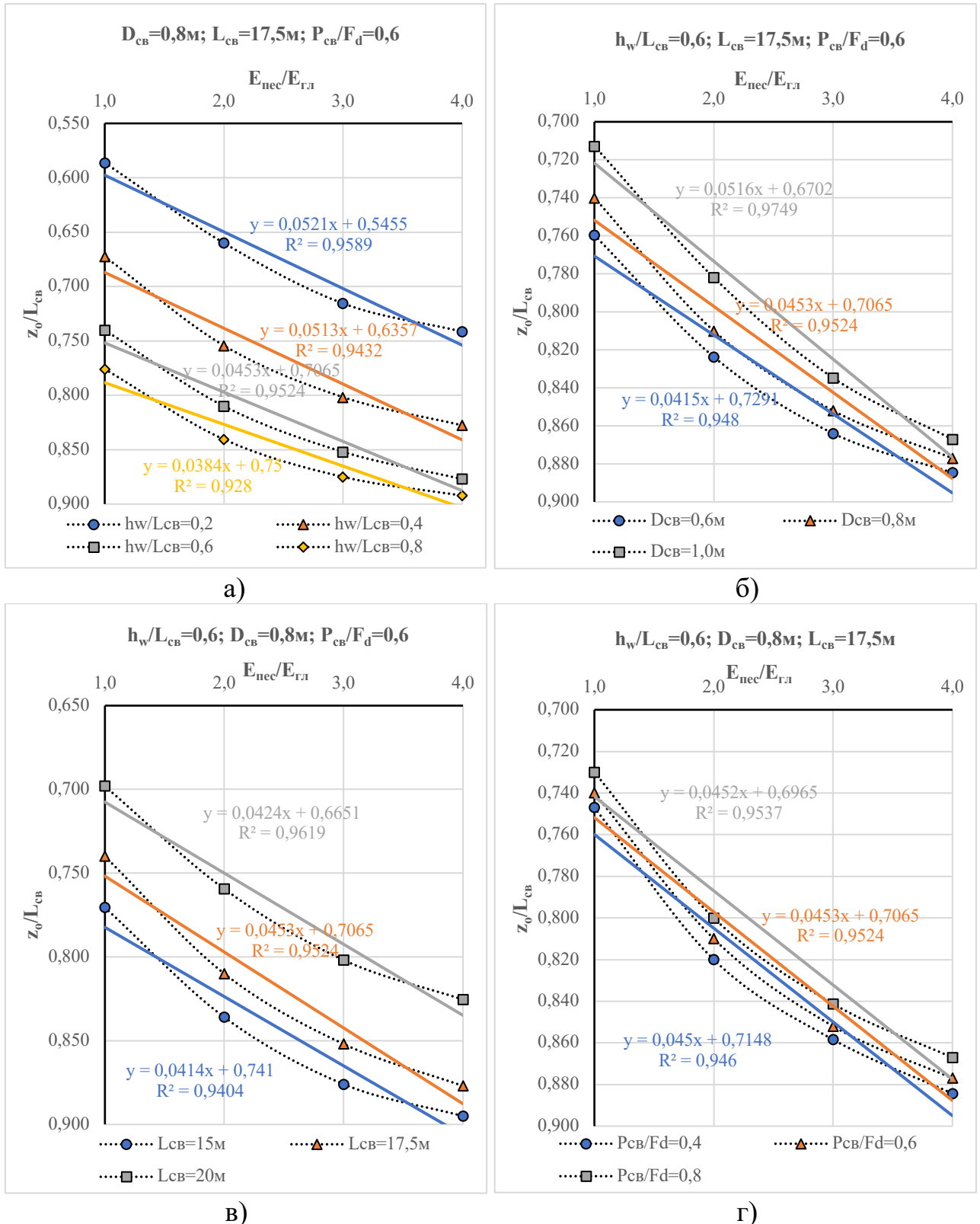


Рисунок 4.2 – Графики зависимости $z_0/L_{cb} = f(E_{пес}/E_{гл})$

- а) для различных значений h_w/L_{cb} ; б) для различных значений D_{cb} ;
- в) для различных значений L_{cb} ; г) для различных значений P_{cb}/F_d

Предпочтителен первый вариант с использованием номограмм, поскольку второй требует для его использования наличия большого числа графиков.

4.2 Ключ к номограмме

На Рисунке 4.3 представлена типовая номограмма для определения нормализованной глубины расположения нейтральной точки 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 сваи $P_{св}/F_d$ (X_4) для одиночной сваи с вертикальной нагрузкой или отношения $E_{пес}/E_{гл}$ (X_4) - для сваи без вертикальной нагрузки.

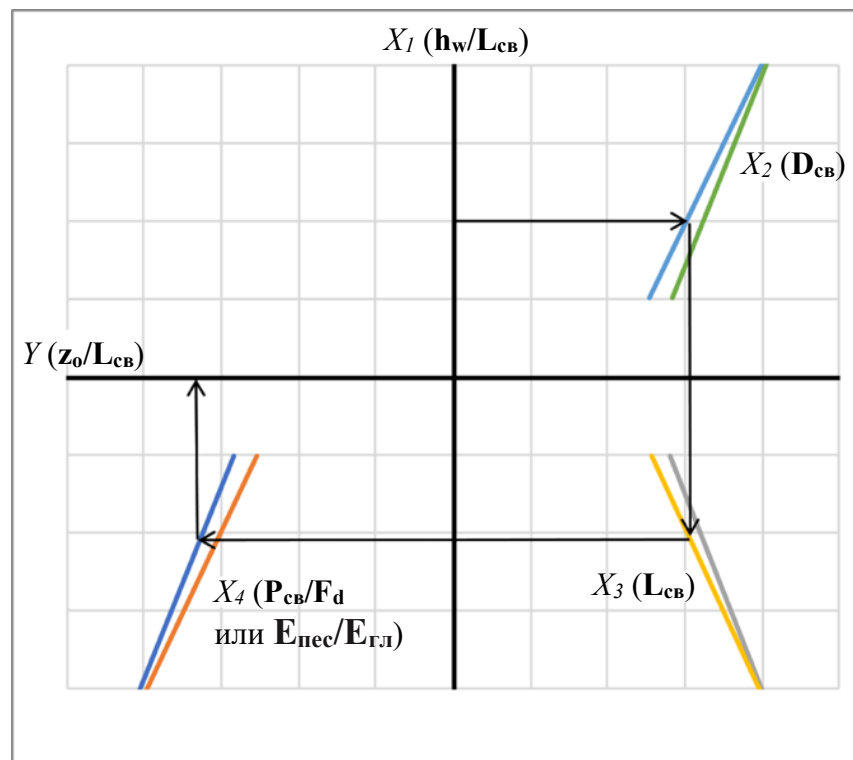


Рисунок 4.3 – Ключ использования номограммы

Расче по номограмме выполняется пошагово в следующей последовательности:

1. На вертикальной оси откладывается нормализованная глубина водопонижения (X_1);
2. Из точки, обозначающей нормализованную глубину водопонижения (X_1) проводится горизонтальная направляющая до пересечения с графиком второго фактора (X_2);

3. От точки пересечения с графиком (X_2) проводится вертикальная направляющая до пересечения с графиком третьего фактора (X_3);
4. От точки пересечения с графиком (X_3) проводится горизонтальная направляющая до пересечения с графиком четвертого фактора (X_4);
5. От точки пересечения с графиком (X_4) проводится вертикальная направляющая до пересечения с горизонтальной осью. Точка пересечения с горизонтальной осью является нормализованной (относительной) глубиной положения нейтральной точки.

4.3 Построение номограмм

Для построения номограмм использовались результаты математического моделирования четырехфакторной модели. Ниже представлены номограммы полученных для одиночной сваи без вертикальной нагрузки (Рисунки 4.4) и для одиночной сваи с вертикальной нагрузкой (для различных значений соотношения $E_{пес}/E_{г.л}$ (Рисунки 4.5 ... 4.8)

4.3.1 Номограмма для одиночной сваи без вертикальной нагрузки ($P_{св}/F_d = 0$)

Поочередно варьируя значениями факторов уравнения 3.27 были получены следующие зависимости:

$$Y = 0,854 + 0,044X_1$$

$h_w/L_{св} (X_1)$	$D_{св} (X_2)$		
	0,6м	0,8м	1м
0,2	0,810	0,810	0,810
0,4	0,839	0,839	0,839
0,6	0,869	0,869	0,869
0,8	0,898	0,898	0,898

$$Y = 0,854 + 0,044X_1 - 0,014X_3$$

$h_w/L_{св} (X_1)$	$L_{св} (X_3)$		
	15м	17,5м	20м
0,2	0,824	0,810	0,796
0,4	0,853	0,839	0,825
0,6	0,883	0,869	0,855
0,8	0,912	0,898	0,884

$$Y = 0,854 + 0,044X_1 + 0,044X_4$$

$h_w/L_{св} (X_1)$	$E_{пес}/E_{гл} (X_4)$			
	1	2	3	4
0,2	0,796	0,820	0,845	0,869
0,4	0,825	0,850	0,874	0,898
0,6	0,855	0,879	0,903	0,928
0,8	0,884	0,908	0,933	0,957

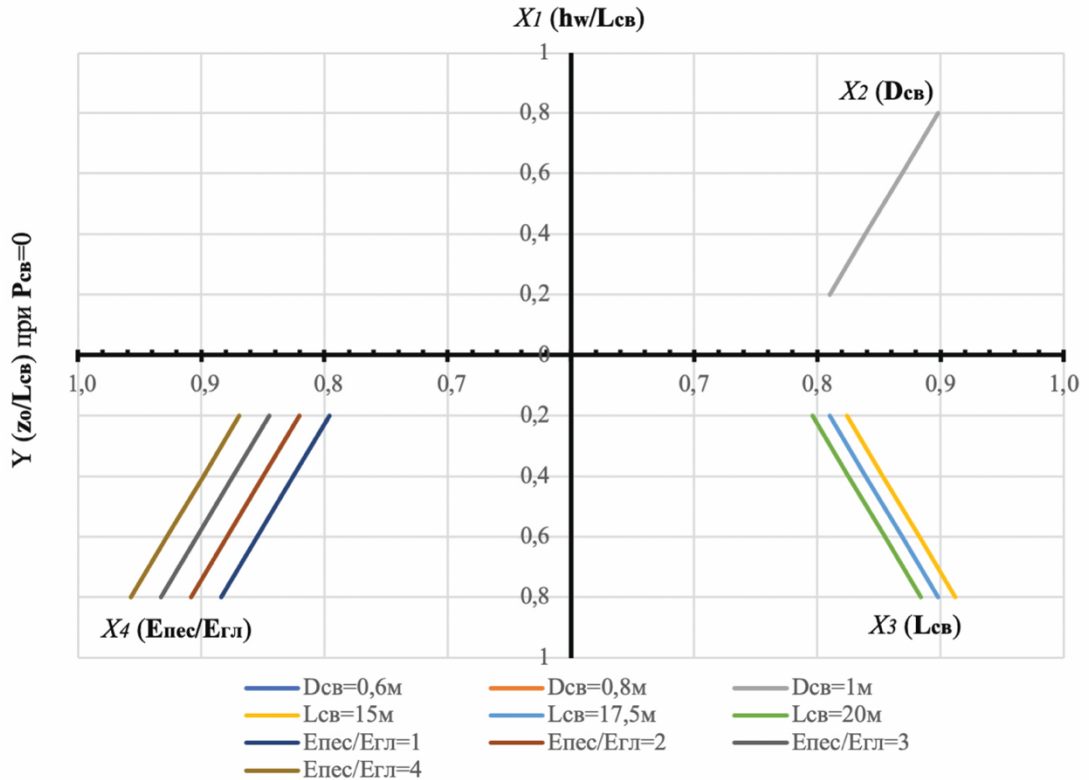


Рисунок 4.4 – Номограмма для определения НТ для различных значений $h_w/L_{св}$, $D_{св}$, $L_{св}$ и $E_{пес}/E_{гл}$ ($P_{св}/F_d = 0$)

4.3.2 Номограмма для одиночной сваи с вертикальной нагрузкой ($E_{пес}/E_{гл} = 1$)

Поочередно варьируя значениями факторов уравнения 3.28 были получены следующие зависимости:

$$Y = 0,671 + 0,11X_1 - 0,038X_2 + 0,023X_1X_2$$

$X_1 (h_w/L_{св})$	$X_2 (D_{св})$		
	-1	0	1
-1	0,622	0,561	0,5
0	0,709	0,671	0,633
1	0,796	0,781	0,766

$$Y = 0,671 + 0,11X_1 - 0,025X_3$$

$X_1 (h_w/L_{св})$	$X_3 (L_{св})$		
	-1	0	1
-1	0,536	0,561	0,586
0	0,646	0,671	0,696
1	0,756	0,781	0,806

$$Y = 0,671 + 0,11X_1 - 0,022X_4 + 0,013X_1X_4$$

$X_1 (h_w/L_{св})$	$X_4 (P_{св}/F_d)$		
	-1	0	1
-1	0,596	0,561	0,526
0	0,693	0,671	0,649
1	0,79	0,781	0,772

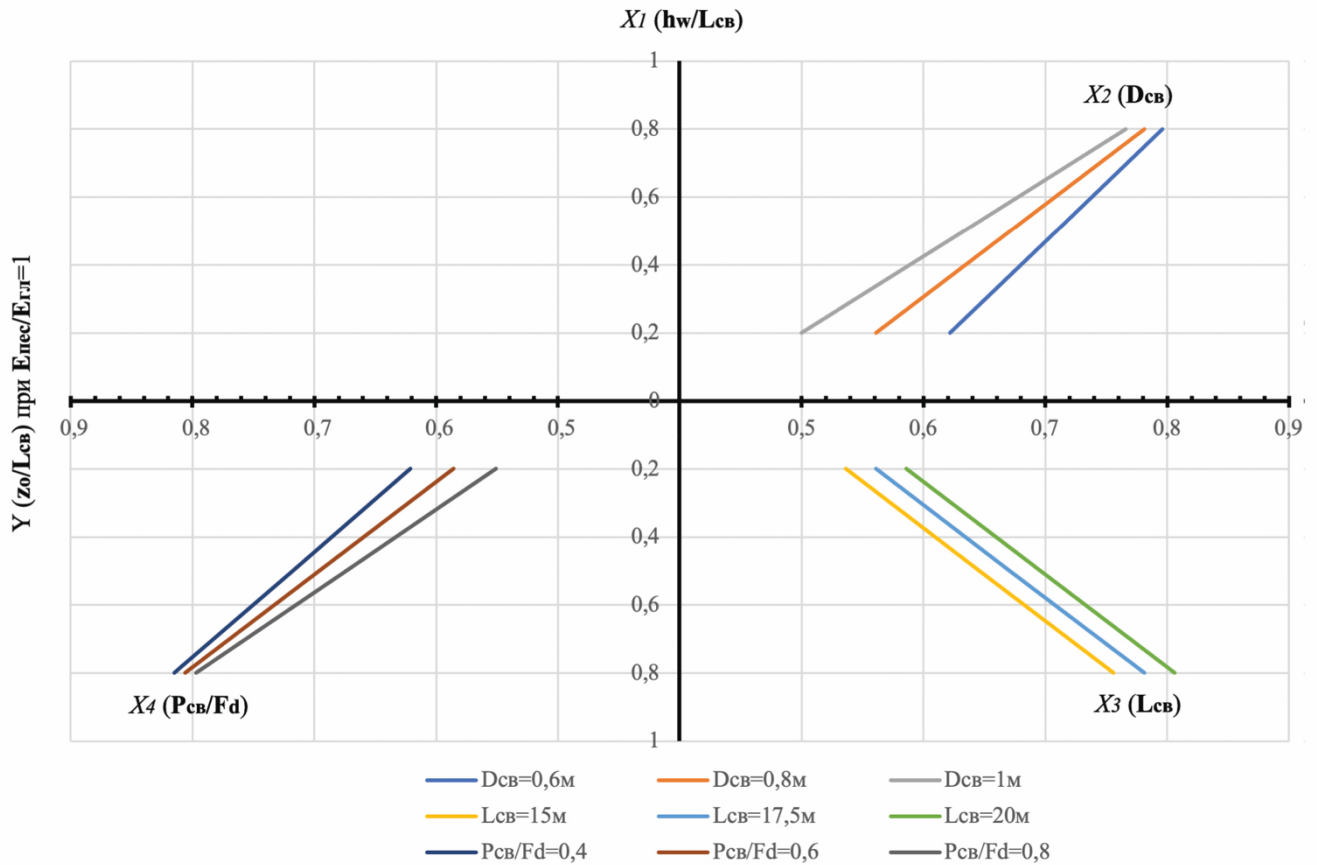


Рисунок 4.5 – Номограмма для определения НТ для различных значений $h_w/L_{св}$, $D_{св}$, $L_{св}$ и $P_{св}/F_d$ ($E_{пес}/E_{гг}=1$)

4.3.3 Номограмма для одиночной сваи с вертикальной нагрузкой ($E_{пес}/E_{гг} = 2$)

Поочередно варьируя значениями факторов уравнения 3.29 были получены следующие зависимости:

$$Y = 0,745 + 0,091X_1 - 0,022X_2$$

X_1 (h_w/L_{CB})	X_2 (D_{CB})		
	-1	0	1
-1	0,676	0,654	0,632
0	0,767	0,745	0,723
1	0,858	0,836	0,814

$$Y = 0,745 + 0,091X_1 - 0,02X_3$$

X_1 (h_w/L_{CB})	X_3 (L_{CB})		
	-1	0	1
-1	0,674	0,654	0,634
0	0,765	0,745	0,725
1	0,856	0,836	0,816

$$Y = 0,745 + 0,091X_1 - 0,02X_4$$

X_1 (h_w/L_{CB})	X_4 (P_{CB}/F_d)		
	-1	0	1
-1	0,674	0,654	0,634
0	0,765	0,745	0,725
1	0,856	0,836	0,816

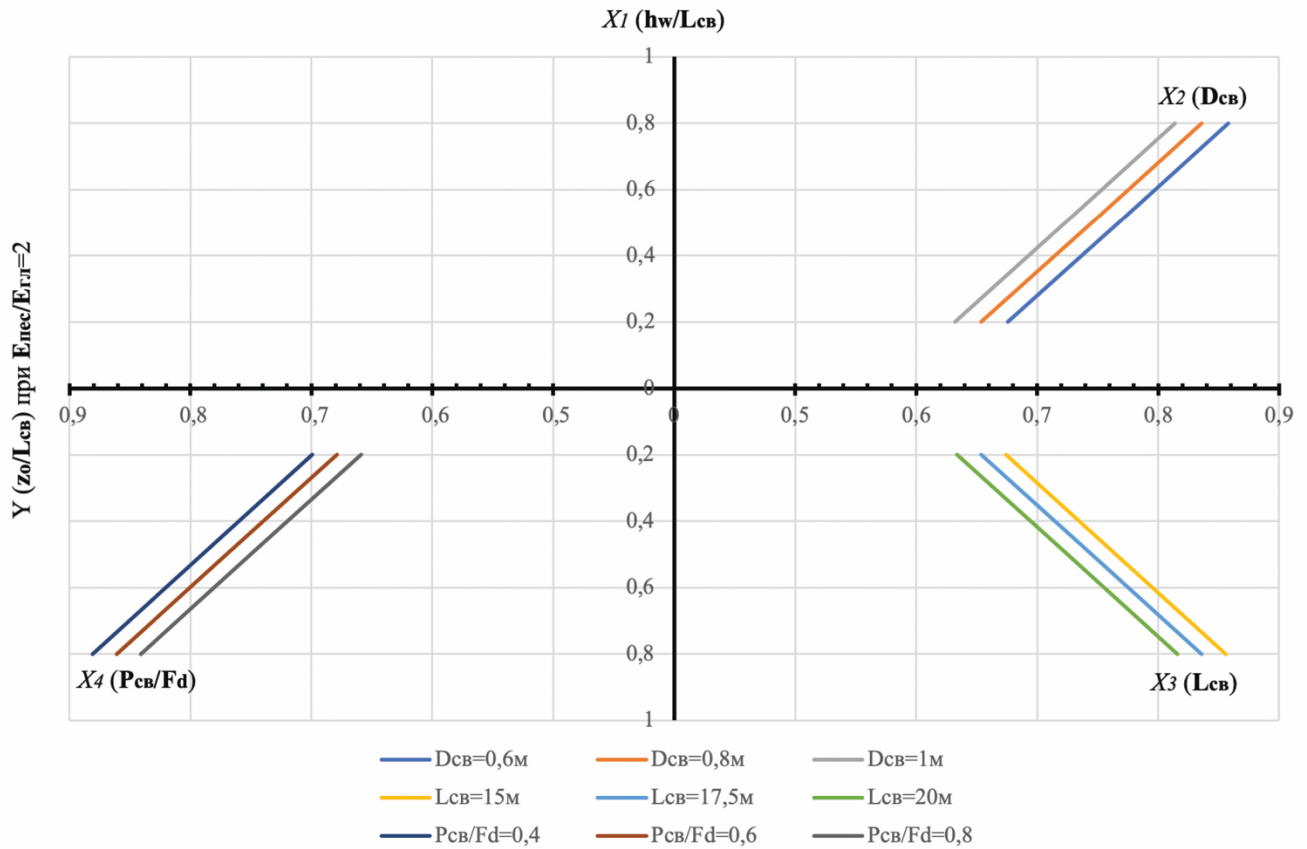


Рисунок 4.6 – Номограмма для определения НТ для различных значений h_w/L_{CB} , D_{CB} , L_{CB} и P_{CB}/F_d ($E_{пес}/E_{гл}=2$)

4.3.4 Номограмма для одиночной сваи с вертикальной нагрузкой ($E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}} = 3$)

Поочередно варьируя значениями факторов уравнения 3.30 были получены следующие зависимости:

$$Y = 0,788 + 0,08X_1 - 0,023X_2 + 0,014X_1X_2$$

X_1 ($h_w/L_{\text{св}}$)	X_2 ($D_{\text{св}}$)		
	-1	0	1
-1	0,745	0,708	0,671
0	0,811	0,788	0,765
1	0,877	0,868	0,859

$$Y = 0,788 + 0,08X_1 - 0,022X_3$$

X_1 ($h_w/L_{\text{св}}$)	X_3 ($L_{\text{св}}$)		
	-1	0	1
-1	0,73	0,708	0,686
0	0,81	0,788	0,766
1	0,89	0,868	0,846

$$Y = 0,788 + 0,08X_1 - 0,019X_4$$

X_1 ($h_w/L_{\text{св}}$)	X_4 ($P_{\text{св}}/F_d$)		
	-1	0	1
-1	0,727	0,708	0,689
0	0,807	0,788	0,769
1	0,887	0,868	0,849

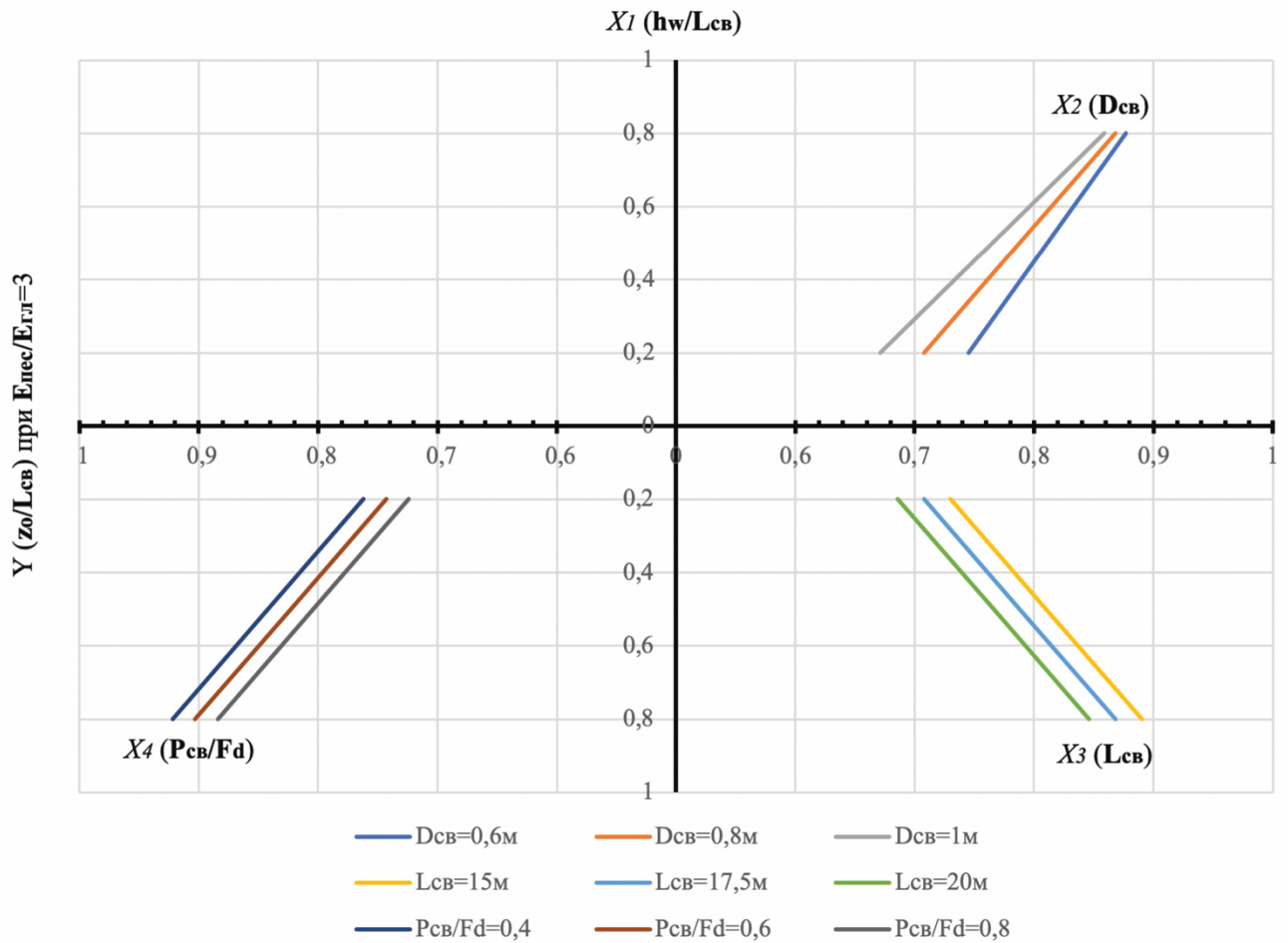


Рисунок 4.7 – Номограмма для определения НТ для различных значений h_w/L_{cb} , D_{cb} , L_{cb} и P_{cb}/F_d ($E_{пес}/E_{гл}=3$)

4.3.5 Номограмма для одиночной сваи с вертикальной нагрузкой ($E_{пес}/E_{гл} = 4$)

Поочередно варьируя значениями факторов уравнения 3.31 были получены следующие зависимости:

$$Y = 0,813 + 0,074X_1 - 0,017X_2 + 0,011X_1X_2$$

$X_1 (h_w/L_{cb})$	$X_2 (D_{cb})$		
	-1	0	1
-1	0,767	0,739	0,711
0	0,83	0,813	0,796
1	0,893	0,887	0,881

$$Y = 0,813 + 0,074X_1 - 0,019X_3$$

$X_1 (h_w/L_{cb})$	$X_3 (L_{cb})$		
	-1	0	1
-1	0,758	0,739	0,72
0	0,832	0,813	0,794
1	0,906	0,887	0,868

$$Y = 0,813 + 0,074X_1 - 0,021X_4$$

$X_1 (h_w/L_{cb})$	$X_4 (P_{cb}/F_d)$		
	-1	0	1
-1	0,76	0,739	0,718
0	0,834	0,813	0,792
1	0,908	0,887	0,866

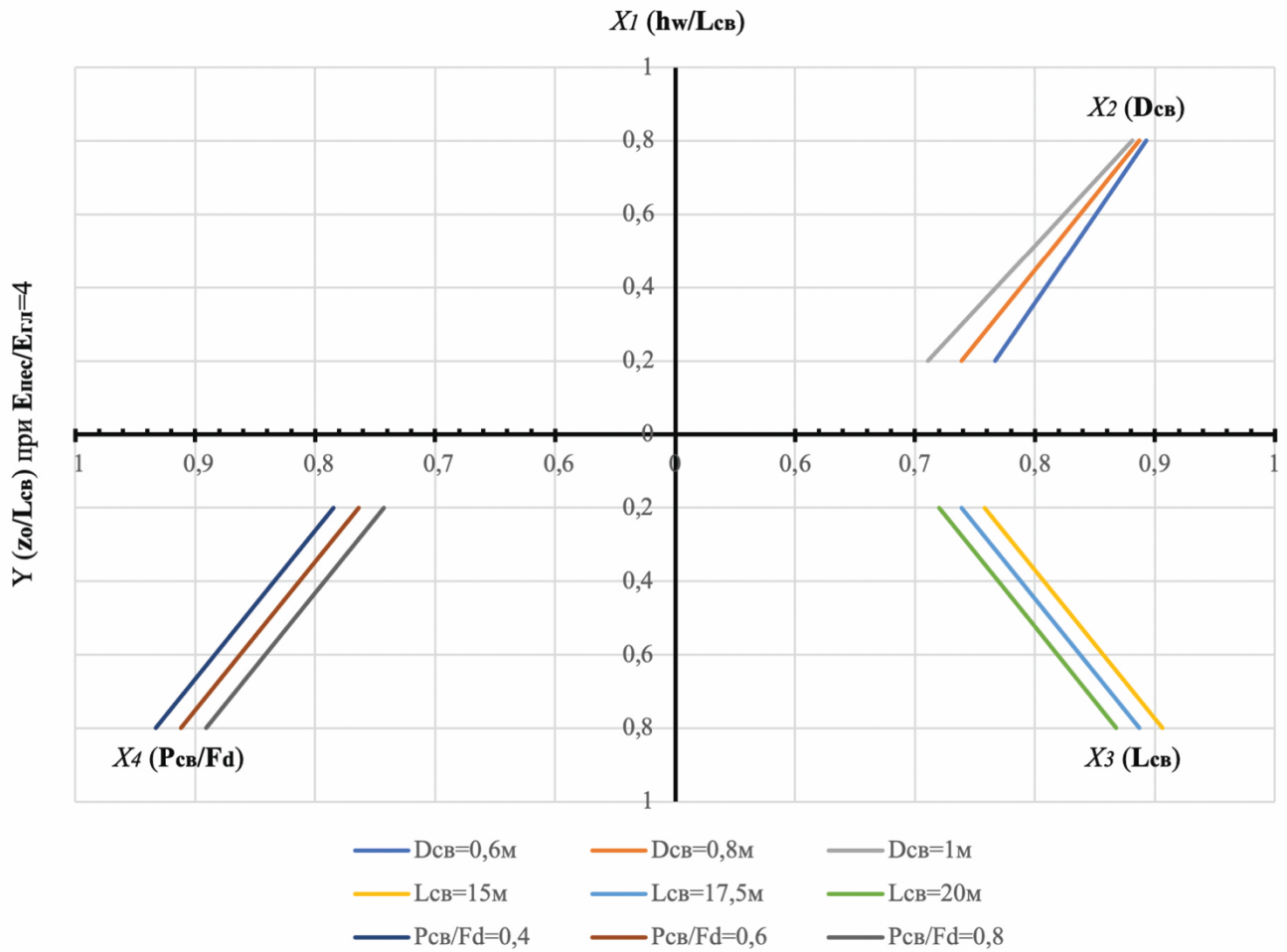


Рисунок 4.8 – Номограмма для определения НТ для различных значений h_w/L_{cb} , D_{cb} , L_{cb} и P_{cb}/F_d ($E_{пес}/E_{гл}=4$)

4.4 Примеры определения «нулевой точки» с помощью номограмм

Пример 1: Определить положение нулевой точки для сваи размером $D_{св}=0,8м$ и $L_{св}=17,5м$. Грунтовые условия: $E_{пес}/E_{гл}=1$. Уровень нагружения: $P_{св}/F_d=0,6$. Уровень водопонижения: $h_w/L_{св}=0,6$.

Решение (см. Рисунок 4.9):

1. На вертикальной оси (X_1) откладываем $h_w/L_{св}=0,6$;
2. Из точки $h_w/L_{св}=0,6$ проводим горизонтальную направляющую до пересечения с графиком (X_2) для $D_{св}=0,8м$;
3. Из точки пересечения с графиком фактора (X_2) проводим вертикальную направляющую до пересечения с графиком фактора (X_3) для $L_{св}=17,5м$;
4. Из точки пересечения с графиком фактора (X_3) проводим горизонтальную направляющую до пересечения с графиком фактора (X_4) для $P_{св}/F_d=0,6$;
5. Из точки пересечения с графиком фактора (X_4) проводим вертикальную направляющую до пересечения с горизонтальной осью и в точке пересечения получаем искомое положение НТ $z_0/L_{св} \approx 0,74$.

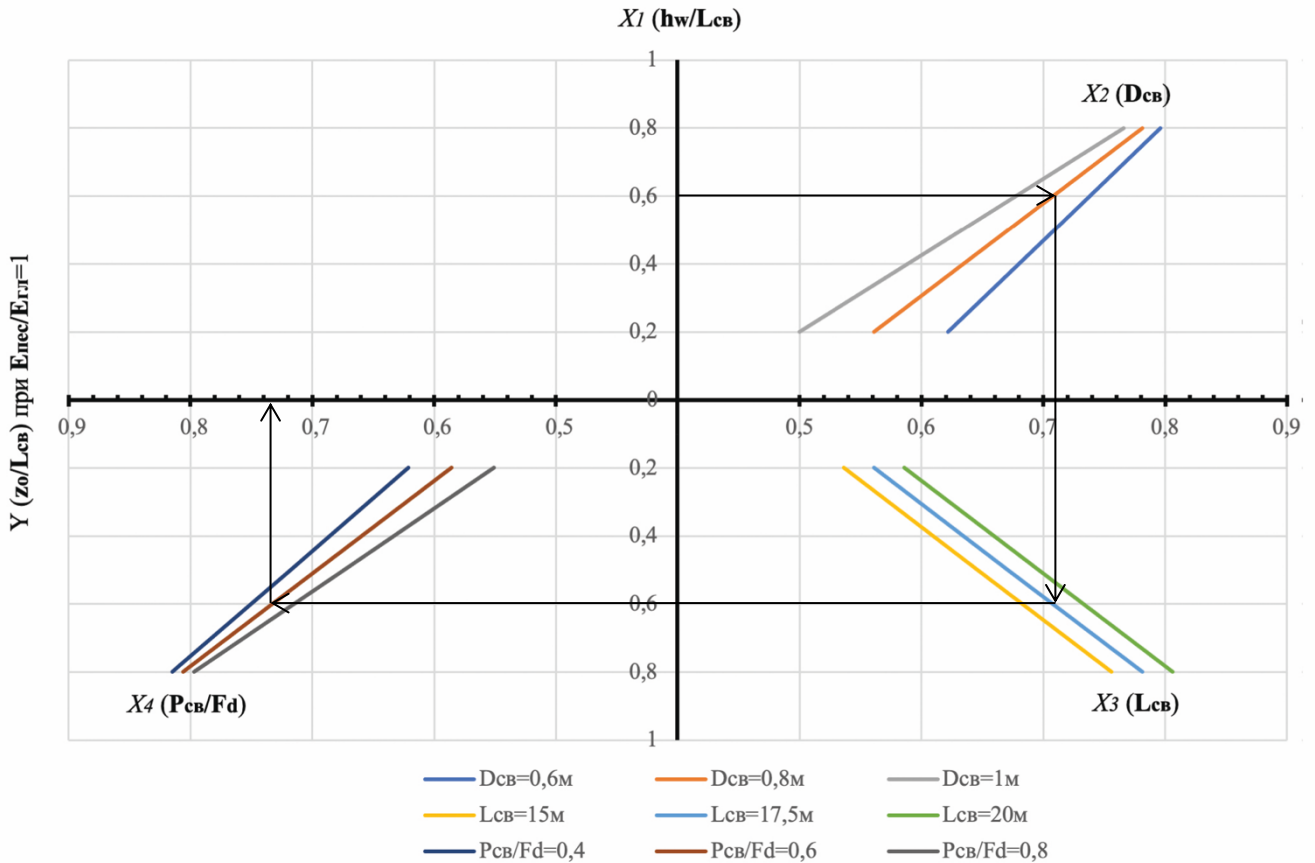


Рисунок 4.9 – Номограмма для определения НТ (Пример 1)

Пример 2: Определить положение нулевой точки для сваи размером $D_{св}=0,8м$ и $L_{св}=17,5м$. Грунтовые условия: $E_{пес}/E_{гг}=4$. Уровень нагружения: $P_{св}/F_d=0,6$. Условие водопонижения: $h_w/L_{св}=0,6$.

Решение (см. Рисунок 4.10):

1. На вертикальной оси (X_1) откладываем $h_w/L_{св}=0,6$;
2. Из точки $h_w/L_{св}=0,6$ проводим горизонтальную направляющую до пересечения с графиком (X_2) для $D_{св}=0,8м$;
3. Из точки пересечения с графиком фактора (X_2) проводим вертикальную направляющую до пересечения с графиком фактора (X_3) для $L_{св}=17,5м$;
4. Из точки пересечения с графиком фактора (X_3) проводим горизонтальную направляющую до пересечения с графиком фактора (X_4) для $P_{св}/F_d=0,6$;
5. Из точки пересечения с графиком фактора (X_4) проводим вертикальную направляющую до пересечения с горизонтальной осью и в точке пересечения получаем искомое положение НТ $z_0/L_{св} \approx 0,86$.

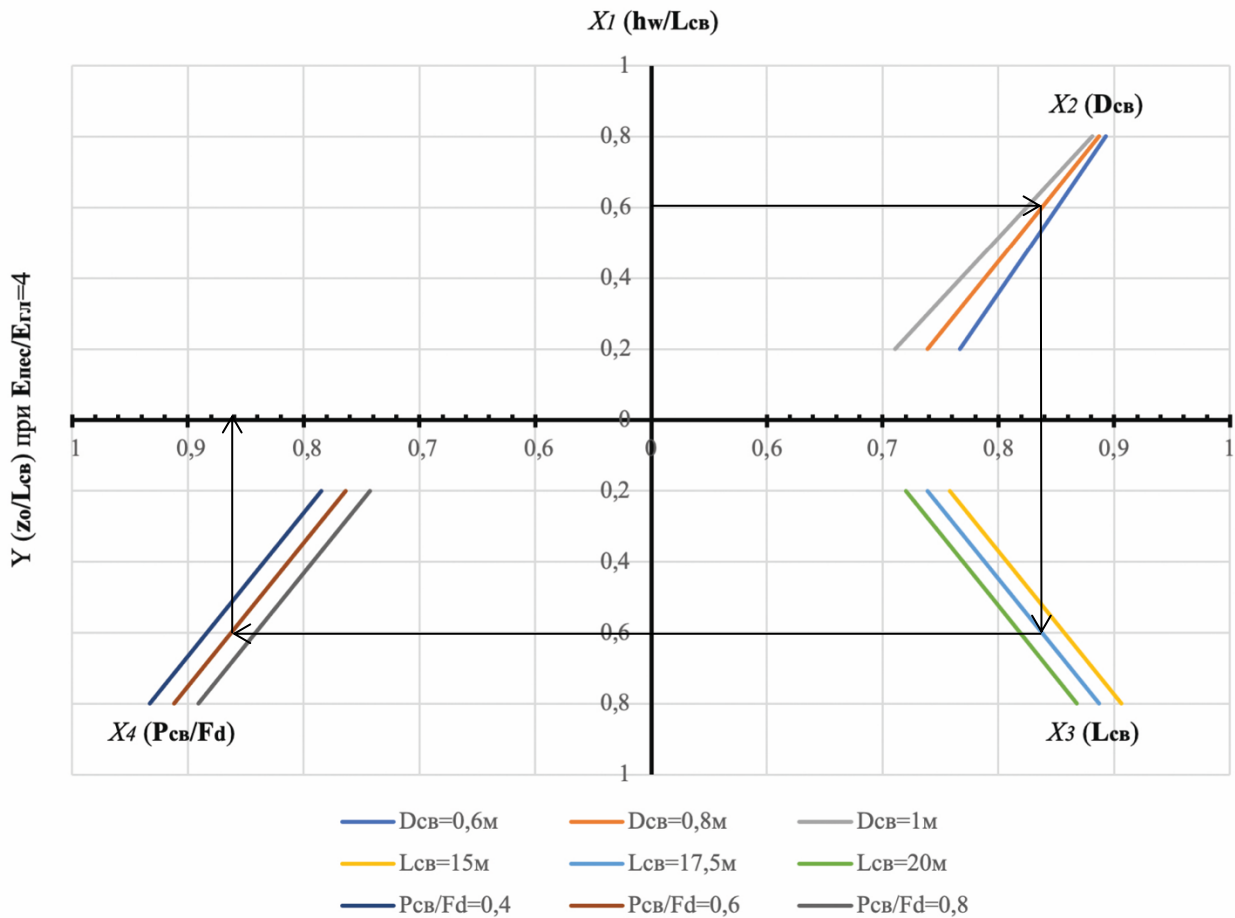


Рисунок 4.10 – Номограмма для определения НТ (Пример 2)

Аналогичные расчеты были выполнены для той же сваи при том же уровне ее нагружения для $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}=2$ и $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}=3$. Результаты всех 4-х выполненных определений нормализованной глубины нулевой точки приведены на Рисунке 4.11 в виде графика $z_0/L_{\text{св}} = f(E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}})$, отражающего увеличение нормализованной глубины расположения «нулевой точки» с увеличением отношения $E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}}$, т.е. с увеличением жесткости грунта под нижним концом сваи по отношению к жесткости грунта вдоль ее ствола.

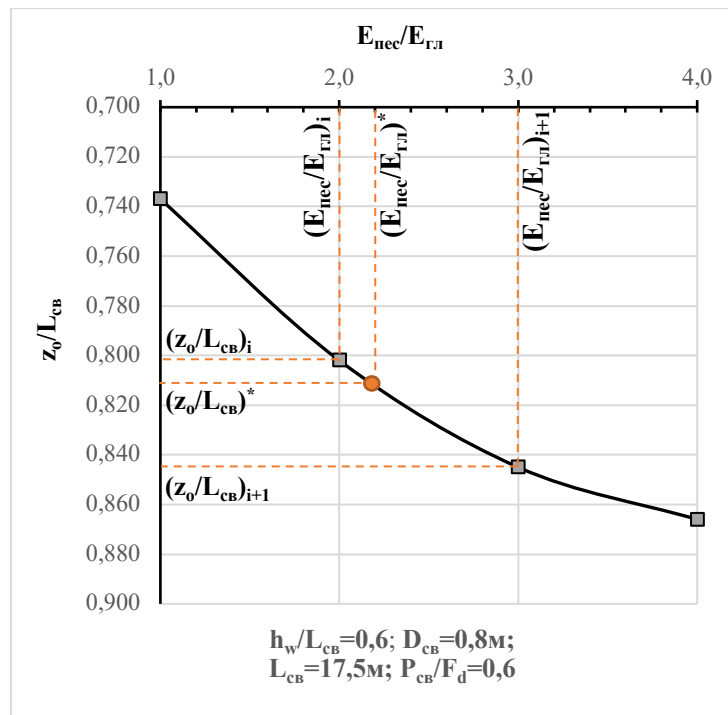


Рисунок 4.11 – Графики зависимости $z_0/L_{\text{св}} = f(E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}})$

Согласно этому графику значение нормализованной глубины расположения «нулевой точки» $(z_0/L_{\text{св}})^*$ для $(E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}})^*$ можно определить по формуле (4.2), как промежуточное между двумя ближайшими найденными по номограммам значениями $z_0/L_{\text{св}}$:

$$\begin{aligned} (z_0/L_{\text{св}})_i < (z_0/L_{\text{св}})^* < (z_0/L_{\text{св}})_{i+1} \\ (E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}})_i < (E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}})^* < (E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}})_{i+1} \end{aligned}$$

$$(z_0/L_{\text{св}})^* = [(z_0/L_{\text{св}})_{i+1} - (z_0/L_{\text{св}})_i] \frac{(E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}})^* - (E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}})_i}{(E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}})_{i+1} - (E_{\text{пес}}/E_{\text{гл}})_i} + (z_0/L_{\text{св}})_i \quad (4.2)$$

где $i=\{1, 2, 3\}$

Например, для сваи размером $D_{св}=0,8\text{м}$ и $L_{св}=17,5\text{м}$ при уровне водопонижения $h_w/L_{св}=0,6$ и уровне нагружения сваи $P_{св}/F_d=0,6$ по двум найденным по номограмма значениям для $(E_{пес}/E_{гл})_i=2$ $(z_0/L_{св})_i=0,802$ и $(E_{пес}/E_{гл})_{i+1}=3$ $(z_0/L_{св})_{i+1}=0,845$ (см. Рисунок 4.12) найти значение $(z_0/L_{св})^*$ для $(E_{пес}/E_{гл})^*=2,2$.

$$(z_0 / L_{св})^* = [0,845 - 0,802] \cdot \frac{2,2 - 2}{3 - 2} + 0,802 = 0,8106$$

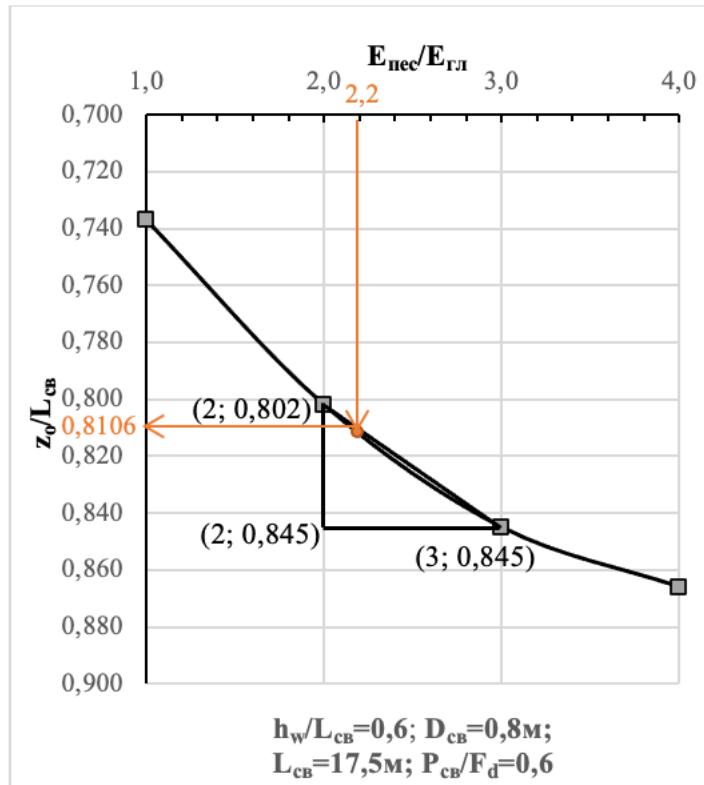


Рисунок 4.12 – Пример определения $(z_0/L_{св})^*$ по двум

ближайшим значениям, соответствующим $E_{пес}/E_{гл} = 2$ и 3

4.5 Пример определения несущей способности сваи при известной глубине водопонижения

Пример 3: Определить несущую способность одиночной буровой сваи размером $D_{св}=1\text{м}$ и $L_{св}=20\text{м}$. Отношение жесткости грунтового массива вдоль ствола сваи и под ее нижним концом $E_{пес}/E_{гл}=3$. Глубина водопонижения $h_w=8\text{м}$ ($h_w/L_{св}=0,4$).

Решение:

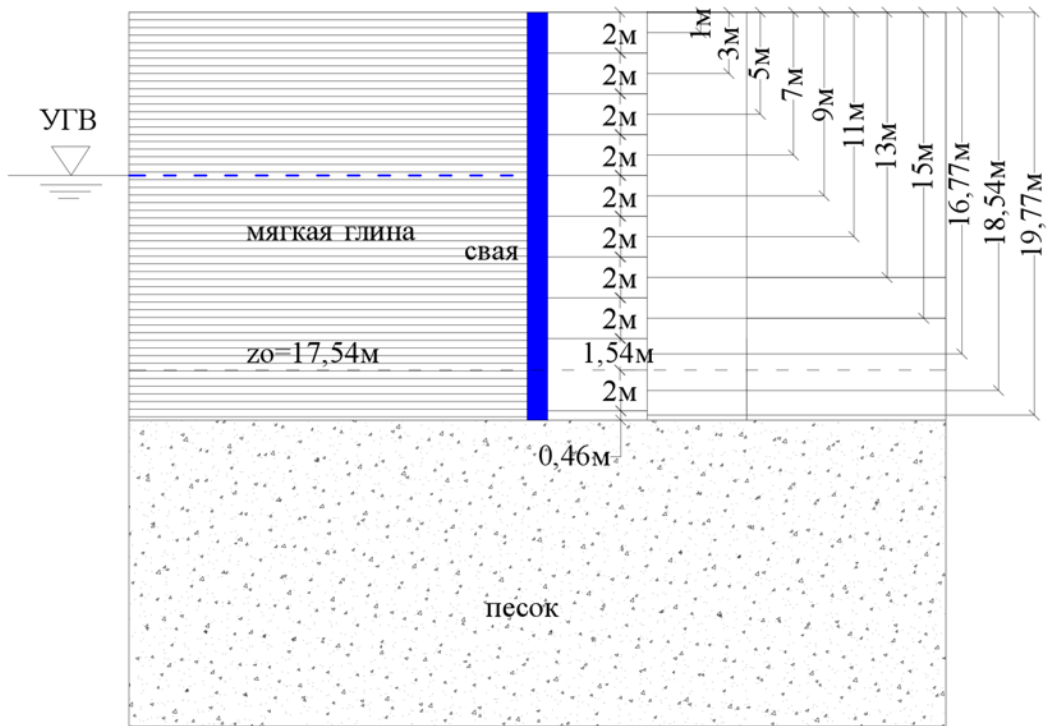


Рисунок 4.13 – Определение несущей способности сваи (Пример 3)

По номограмме на Рисунке 4.4 определим $z_0/L_{св}=0,877 \Rightarrow z_0=17,54\text{м}$.

По таблице 7.7 СП24.13330.2011 [52] для $\varphi_{(\text{песка})} = 38^\circ$

$\Rightarrow \alpha_1=135,5; \alpha_2=222,5; \alpha_3=0,765; \alpha_4=0,222$

Тогда: $R = 0,75 \cdot 0,222 \cdot 0,9$

$$\begin{aligned} & \cdot (0,9 \cdot 135,5 \cdot 19,5 \cdot 1 + 0,9 \cdot 222,5 \cdot 0,9 \cdot 0,765 \cdot 16 \cdot 20) = \\ & = 6968 \text{ кПа} \end{aligned}$$

По таблице 7.3 СП24.13330.2011 [52] для $I_{L(\text{глина})} = 0,7$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \sum_{z=0}^{z=17,54} f_{i,\text{отр}} \cdot h_i &= 4 \cdot 2 + 8 \cdot 2 + 10 \cdot 2 + 10 \cdot 2 + 10 \cdot 2 + \\ & + 10,2 \cdot 2 + 10,6 \cdot 2 + 11 \cdot 2 + 11,345 \cdot 1,54 = 165,1 \text{ кН/м} \end{aligned}$$

$$\sum_{z=17,54}^{z=20} f_i \cdot h_i = 11,708 \cdot 2 + 11,954 \cdot 0,46 = 28,9 \text{ кН/м}$$

Несущая способность сваи с учетом сил отрицательного трения составит:

$$F_d^* = \gamma_c \left[\gamma_{cR} R A + \gamma_{cf} u \left(\sum_{z=z_0}^{z=L_{св}} f_i h_i - \sum_{z=0}^{z=z_0} f_{i,\text{отр}} h_i \right) \right] =$$

$$= 1 \cdot [1 \cdot 6968 \cdot 0,785 + 0,7 \cdot 3,14 \cdot (28,9 - 165,1)] \approx 5171 \text{ кН}$$

Тогда допускаемая нагрузка на голову сваи:

$$P_{св} = \frac{1 \cdot 5171}{1,2 \cdot 1,4} \approx 3078 \text{ кН.}$$

Выводы по главе 4

1. Полученные в результате математического моделирования аналитические зависимости позволяют определить положение «нулевой плоскости», разделяющей положительные и отрицательные силы трения, действующие по боковой поверхности работающей в условиях оседающего при водопонижении грунта сваи в зависимости от различных факторов и их сочетаний., что необходимо для правильной оценки ее несущей способности.

2. 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.

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

4. Представленные номограммы носят демонстрационный характер, для практического использования с целью повышения точности расчетов их следует выполнить с более мелкой градацией влияющих факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполненные исследования показали, что понижение уровня подземных вод оказывает существенное влияние на работу сваи в слабом водонасыщенном глинистом грунте. Это влияние заключается в развитии на боковой поверхности сваи 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 сваи и может вызвать потерю сваей несущей способности.

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

3. Численные исследования динамики развития сил отрицательного трения на боковой поверхности буровой сваи 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 местоположение «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 определения 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 объемов 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 проектирований 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абелев, М. Ю. Особенности строительства сооружений на слабых водонасыщенных грунтах / М. Ю. Абелев // Промышленное и гражданское строительство. - М.: Стройиздат, 1983. - 248с.
2. Акопян, В.Ф., Кондрик, И.В. и Самсонов, О.В. Моделирование отрицательных сил трения при реализации просадочных свойств грунта / В.Ф. Акопян, И.В. Кондрик, О.В. Самсонов// Инженерный вестник Дона. – 2018. - №1. - С. 48.
3. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Стройиздат, 1976. – 280 с.
4. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер. – М. : Стройиздат, 1976. – 588 с.
5. Аль Кадри Убайда. Совершенствование метода устройства оснований на слабых водонасыщенных грунтах с помощью извести и исследование его применимости в условиях Сирийской Арабской Рерублики: дис. ... канд. техн. наук / Аль Кадри Убайда. – М., 1995. – 135с.
6. Березанцев, В.Г. Исследование прочности песчаных оснований: научное издание / В.Г. Березанцев, В.А. Ярошенко, А.Г. Прокопович, И.Ф. Разоренов, Н.Н. Сидоров . - М.: Трансжелдориздат, 1958. - 140 с.
7. Васенин, В.А. Численное моделирование испытаний буронабивных свай и барреты для строительства высотного здания в Санкт-Петербурге // Геотехника. – 2010. – №5. – С.38-47.
8. Во Фан. Анализ влияния отрицательного трения сил на боковой поверхности свай в отношении со степенью консолидации грунтов / Во Фан, Ле Фыонг, Во Нгок Ха// Журнал для строительства, 2014, - №5. - С. 66-70, ISSN: 0866-8531 (По-Вьетнамски).
9. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. - Москва: Высшее образование, - 2007. - 404с.
10. Готман, Н.З. Определение параметров сплошного свайного поля из забивных свай// Основания, фундаменты и механика грунтов. - 2003. – №2. – С. 2-6.

11. Далматов, Б.И. Исследование послойных деформаций основания моделей свайных фундаментов/ Б.И. Далматов, А.В. Пилягин // В кн.: Механика грунтов, основания и фундаменты: Краткие содержания докладов к XXVI научной конференции ЛИСИ, Ленинград, 1968, с.15-18.
12. Далматов, Б.И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов./ Б.И. Далматов, Ф.К. Лапшин, Ю. В. Россихин // Под ред. д-ра техн. наук проф. Б.И. Далматова. Л., Стройиздат, Ленингр. От-ние, 1975. – 240с.
13. Девальтовский, Е.Э. Исследование работы свайных фундаментов с учетом их взаимодействия с межсвайным грунтом: дис.....канд.техн.наук. / Девальтовский Евгений Эдуардович. – Ленинград, 1982.
14. Динг Хоанг Нам. Взаимодействие длинных свай с грунтам в свайном фундаменте: дисс. канд. техн. наук / Динь Хоанг Нам. – М., 2006. – 163с.
15. Дорошкевич, Н.М. Инженерные методы расчета свайных фундаментов при различных схемах их нагружения / Н.М. Дорошкевич, В.В. Знаменский, В.И. Кудинов // Вестник МГСУ, 2006. – №1. - С.119-132.
16. Егоров К.Е. Распределение напряжений и перемещений в двухслойном грунте основания ленточного основания // Сборник трудов научно-исследовательского отдела свайных и естественных оснований, № 10 Стройиздат, 1939.
17. Зерцалов, М.Г. Об особенностях расчета несущей способности буронабивных свай в скальных массивах при действии вертикальной нагрузки / М.Г. Зерцалов, В.В. Знаменский и И.Н. Хохлов // Вестник Иермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура, 2018. – Т.9. №1. – С.52-59.
18. Знаменский, В.В. Работа свайного фундамента в глинистых грунтах и расчет их по деформациям: дис. ... канд. техн. наук. / Знаменский Владимир Валерианович. – М., 1971.
19. Знаменский, В. В. Экспериментальные исследования работы и инженерные методы расчета свайных групп из забивных свай : дис. ... док. техн. наук / Знаменский Владимир Валерианович. - М., 2002. - 375 с. : ил.

20. 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.
21. 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.
22. Зеленкова, Н.И. Оценка гидрогеологических условий площадки строительства: Задания и методические указания для выполнения курсовой работы по курсу «Инженерная геология» / Н.И. Зеленкова, В.А. Челнокова/ СПб. Гос. Архит.-строит. Ун-т. - 2003. - 56с.
23. Колыбин И.В. Оценка несущей способности сваи в скальных грунтах, переслаиваемых дисперсными грунтами, на действие вертикальной нагрузки/ И.В. Колыбин, Д.Е. Разводовский, А.В. Скориков, А.А. Брыксина// Вестник НИЦ Строительство / 2022. № 3 (34). С. 7-25.
24. Коробова О.А. Напряженно-деформированного состояния анизотропных грунтовых оснований с применением численных методов / О.А. Коробова, Л.А. Максименко, И.Ю. Соловьянова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2020. – № 5 (737). – С. 53-54.
25. Ле, Т.З. An investigation to determine the bearing capacity of driven piles and pressed friction pile using practical method // J. Phys.: Conf. Ser.- 2019.- Т. 1425. - №1. – 012058р.
26. Леденев, В.В. Методика расчета буронабивного фундамента с использованием подхода И.А. Симвулиди / В.В. Леденев, Ть Тхи Хоанг Ань // Сборник статей межд. науч. конф. - Пенза: ПДЗ, 2008. - С.63-66.
27. Нгуен, Д.М. Инженерно-геологическое обеспечение освоения подземного пространства г.Ханоя (Вьетнам): Автореф. дис. на соиск. учен. степ. к.г.-м.н. СПб., 2010.- 24 с.

28. Нгуен, Д.М. Некоторые проблемы освоения и использования подземного пространства в сложных инженерно-геологических условиях города Ханой / Д.М. Нгуен, Р.Э. Дашко // Инженерная геология, 2010. - №3. - С. 56-61.
29. Нгуен, В.К. Основания и фундаменты промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах Вьетнама: дис. ... док. техн. наук / Нгуен Ван Куанг. – Ленинград., 1988. – 374с.
30. Нгуен, Х.С. Исследование развития сил отрицательного трения на боковой поверхности одиночной сваи в сильносжимаемых неполностью водонасыщенных глинистых грунтах: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Нгуен Хонг Синь. - Москва: МГСУ, 1994. - 19 с.
31. Невзоров, А.Л. Основания и фундаменты в схемах и таблицах: учебное пособие / А.Л. Невзоров. – М.: Издательство АСВ, 2017. – 164с.:ил.
32. Нуждин Л.В. Методы построения моделей и расчета системы «свайный фундамент – грунтовое основание» в SCAD Office и SMath Studio / Л.В. Нуждин, В.С. Михайлов// Изв.вузов. Строительство. 2020. № 5. С. 42-52.
33. Нуждин М.Л. Экспериментальные исследования усиления грунтового основания свайных фундаментов армированием жесткими включениями // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 10. – № 3. – С. 5-15.
34. Огранович А.Б. К вопросу определения осадки одиночной сваи // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1963. -№1.
35. Пилягин А.В. Проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений / А.В. Пилягин. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2005. – 248с.
36. Полищук А.И. Оценка несущей способности свай в глинистых грунтах с помощью ПК PLAXIS 3D Foundation [Текст] / А.И. Полищук, Д.Г.Самарин, А.А. Филиппович// Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 3. – С.351-359.

37. Полищук А.И. Инженерный метод расчета осадки инъекционной сваи в глинистом грунте / А.И. Полищук, И.В. Семёнов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2019. – № 5. – С. 23-28.
38. Полищук А.И. Расчет несущей способности буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах / А.И. Полищук, Д.А. Чернявский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2020. – № 4. – С. 2-7.
39. Полищук А.И. Анализ причин появления подземной и атмосферной воды в подвальных помещениях эксплуатируемого здания / А.И. Полищук, Д.А. Чернявский, В.В. Гуменюк, Г.Г. Солонов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2021. №2.
40. Полищук А.И. Развитие метода расчета осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров / А.И. Полищук, О.А. Шмидт // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2021. – № 5. – С. 2-7.
41. Разводовский Д.Е. Проблемы и возможные пути развития нормативной литературы в области проектирования свайных фундаментов/ Д.Е. Разводовский, А.В. Скориков // Вестник НИЦ Строительство. 2020. № 3 (26). С. 74-85.
42. Рекомендации по определению несущей способности забивных свай в водонасыщенных пылевато-глинистых и песчаных грунтах. Ордена трудового красного знамени московский инженерно-строительный институт имени В.В. Куйбышева, кафедра «Механика грунтов, основания и фундамента», - М., 1993. – 21с.
43. Россихин, Ю. В. Некоторые вопросы учета изменений сил трения на боковой поверхности свай в слабых грунтах. Автореферат. дис. на соискание учен. степ. канд. техн. наук, ЛИСИ, Л., 1966.
44. Россихин, Ю. В. Применение свайных фундаментов в районах залегания слабых грунтов. ЛатИНТИ, Рига, 1967.
45. Россихин, Ю. В. Оценка воздействия отрицательного трения на несущую способность свай. – Сб. Несущая способность свай в слабых грунтах», No2, ЛДНТП, Л., - 1966.

46. Россихин, Ю. В. Осадки сооружений на сваях в результате воздействия отрицательного трения. – Сб. Исследования по механике строительных материалов и конструкций, вып. 1, ч. II, РПИ, Рига, - 1967.
47. Рузаева А.М. Оптимизация проектных решений свайных фундаментов с учетом взаимного влияния свай и работы низкого ростверка на их несущую способность : дис. канд. техн. наук / Рузаев Андрей Михайлович. – М., 2010. - 147 с. : ил.
48. Сальников, Б.А. Исследование несущей способности свайных фундаментов в слабых глинистых грунтах: дис. ... канд. техн. наук / Сальников Борис Александрович. – М., 1969. – 301с.
49. Селиверстов, А.Н. Исследование методов возведения свайных фундаментов промышленных зданий в глинистых грунтах Западного Урала: дис. канд. техн. наук. / А.Н. Селиверстов. – М., 1965. – 260с.
50. Сивцова, Е.П. К расчету осадки одиночной сваи на основе теории упругости. Сборник трудов No 45; НИИ оснований, Госстройиздат, М., - 1961.
51. СП 22.13330.2016. Актуализированная версия СНиП 2.02.01-83. Основания зданий и сооружений. – М.: ФГУП ЦПП, 2011. – 186с.
52. СП 24.13330.2011. Актуализированная версия СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. – М.: ФГУП ЦПП, 2011. – 86с.
53. СП 45.13330.2017. Актуализированная версия СНиП 3.02.01-87 Земляные сооружения, основания и фундаменты. - М.: ФГУП ЦПП, 2017. – 171с.
54. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов / З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян // Изд. АСВ. Москва. - 2020. - 912с.
55. Тер-Мартirosян, А.З. Взаимодействие длинной сваи конечной жесткости с окружающим грунтом и ростверком / А.З. Тер-Мартirosян, З.Г. Тер-Мартirosян, Чинь Туан Вьет // Вестник МГСУ, 2015. - No 9 - С.72-82.
56. Тер-Мартirosян, З. Г. Сжимаемость материала сваи при определении осадки в свайном фундаменте / З. Г. Тер-Мартirosян, П.В. Струнин, , Т.В. Чинь // Жилищное строительство.- 2012. - С.10.

57. Тер-Мартirosян, З.Г. Взаимодействие свайного фундамента с грунтом / З.Г. Тер-Мартirosян, З.Н. Нгуен, Х.Н. Динь // Журнал «Основания, фундаменты и механика грунтов». 2007. - No2, - С. 2-7.
58. Тью Тхи Хоанг Ань. Практический метод расчета системы «одноэтажные стальные рамы буронабивные фундаменты» с учетом жесткости их соединений: дис. ... канд. техн. наук / Тью Тхи Хоанг Ань – Тамбов, 2016. – 187с
59. Терцаги, К. Теория механики грунтов. М.: Госстройиздат, 1961. 506 с.
60. Ухов, С.Б. Расчет сооружений и оснований методом конечных элементов / С.Б. Ухов. - М.: МИСИ, 1988. - 221с.
61. Ухов, С.Б. Механика грунтов, основания и фундаменты / С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский, З.Г. Тер-Мартirosян, С.Н. Чернышев // Москва. изд. Высшая школа. - 2007. - 566с.
62. Фадеев, А.Б. 2012. Параметры модели упрочняющегося грунта программа «Plaxis» // Численные методы расчетов в практической геотехнике. Сб. - С.13.
63. Фи, Х.Т. Опасные геологические процессы на территории Ханоя / Фи Хонг Тхинь, Строкова Л.А. // Вестник Томского государственного университета. - 2011. - No309. - С. 200 –204.
64. Фи, Х.Т. Оценка и прогноз оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод на территории г. Ханой (Вьетнам). Автореф. дисс. к.г.-м.н. Томск, 2014. – 20с.
65. Фи, Х.Т. Оценка и прогноз оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод в городе Ханой / Х.Т. Фи, Л.А. Строкова, Н.М. Нгуен// Инженерная геология, 2012. - No2. - С. 52–59.
66. Фи, Х.Т. Слабы грунты на территории г.Ханой / Х.Т. Фи, Л.А. Строкова // Журнал “Инженерная геология”, 01/2014. - No 349. - С. 30–36.
67. Цытович, Н.А. Механика грунтов. М.: Стройиздат, 1963. - 636 с.
68. Чинь, Т.В. Взаимодействие буронабивных длинных свай конечной с окружающим и подстилающим грунтами и ростверком: дис. ... канд. техн. наук / Чинь Туан Вьет. – М., 2015. – 119с.

69. Чунюк, Д.Ю. Применение метода конечных элементов для расчета и проектирования комбинированных свайно-плитных фундаментов. Межвузовский сборник научных трудов по гидротехническому и специальному строительству / Под. ред. д.т.н. проф. Зерцалов М.Г., Апыхименко А.И. / МГСУ, СПбГТУ, 2002.
70. Чунюк, Д.Ю. Применение численного и аналитического эксперимента при моделировании работы комбинированного свайно-плитного фундамента. Сб. трудов 5-ой традиционной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и докторантов «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». МГСУ. - М., 2002.
71. Шапиро, Д.М. Теория и расчетные модели оснований и объектов геотехники: монография/ Д.М. Шапиро. - Воронеж : ИГГУ «Научная книга», 2012. - 164с.
72. Щурин, К.В. Методика и практика планирования и организации эксперимента / К.В. Щурин, Д.А. Косых. – Оренбург, 2012. – 185 с.
73. Bjerrum, L. Reduction of negative skin friction on steel piles to rock / L. Bjerrum, I. J. Johannessen, O. Eide// Proc. 7th ICSMFE, Mexico City, Vol. 2, - 1969. - pp. 27-34.
74. Blanchet, R. Behavior of friction piles in soft sensitive clays / R. Blanchet, F. A. Tavenas, R. Garneau// Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, No. 2, - 1980. - pp. 203-224.
75. Bozozuk, M. Bearing capacity of a pile preloaded by downdrag // Proc. 10th ICSMFE, Stockholm, Vol. 2, - 1981. - pp. 631-636.
76. Broms, B.B. Skin friction resistance for piles in cohesionless soil / B.B. Broms, J.O. Silberman// Sols-Soils, No. 10, - 1964. - pp. 33-41.
77. Buisson, M. Le frottement negatif / M. Buisson, J. Ahu, P. Habiv // Annls inst. Tech. Batim, 145, - 1960. - pp. 29-46.
78. Cao, W. A new load transfer hyperbolic model for pile-soil interface and negative skin friction on single piles embedded in soft soils / W. Cao, Y. Chen, W. Wolfe // International Journal of Geomechanics, 2013.

79. Carlo Viggiani. Piles and Pile Foundations / Carlo Viggiani, Alessandro Mandolini, Gianpiero Russo// CRC Press, - 2012. - 296 p.
80. Chen, R. P. Influences of soil consolidation and pile load on the development of negative skin friction of a pile / R.P. Chen, W.H. Zhou, Y.M. Chen // Computers and Geotechnics 36.8, - 2009. – pp. 1265-1271.
81. Chung, S.H. Numerical analysis of small-scale model pile in unsaturated clayey soil/ S.H. Chung, S.R. Yang // Int. J. Civ. Eng. 15, - 2017. – pp. 877–886.
82. Clemente, F.M. Downdrag on bitumen coated piles in a warm climate// Proc. 10th ICSMFE, Stockholm, Vol.. 2, -1981. - pp. 673-676.
83. Combarieu, O. Frottement né gatif sur les pieux / Rapport de recherche LCPC // Tech. Rep. 136, Laboratoire Central des Ponts et Chaussé es, Paris, France, 1985.
84. Crawford, C.B. Soil Mechanics: BOOK REVIEW. Canadian Geotechnical Journal, 6 (4). 447 doi:10.1139/t69-047. – 1969.
85. EI-Mossallamy, Y.M. Numerical analysis of negative skin friction on piles in soft clay/ Y.M. EI-Mossallamy, A.M. Hefny, M.A. Demerdash, M.S. Morsy // HBRC Journal, vol. 9, no. 1, - 2013. - pp. 68–76.
86. Endo, M. Negative skin friction acting on steel pipe pile in clay / M. Endo, A. Minou, T. Kawasaki, T. Shibata// Proc. 7th ICSMFE, Mexico, -1969. - pp. 85-92.
87. Fellenius, B. H. Negative skin friction and settlement of piles // Proceedings of the Second International Seminar, Pile Foundations, Nanyang Technological Institute, Singapore, - 1984. - 18p.
88. Fellenius, B.H. Negative skin friction for long piles driven in clay / B.H. Fellenius, B.B. Broms// Proc. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, August 25 - 29, Vol. 2, - 1969. - pp. 93-97.
89. Fellenius, B.H. Downdrag on bitumen coated piles / Discussion American Society of Civil Engineers, ASCE // Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 105, GT10, - 1979. - pp. 1262-1265.
90. Fellenius, B.H. Downdrag on piles due to negative skin friction// Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9, No. 4, - 1972. - pp. 323-337.

91. Fellenius, B.H. Negative skin friction on long piles driven in clay. Results of full-scale investigation on instrumented piles/ Swedish Geotechnical Institute, Proc. 25, - 1971. - p. 38.
92. Fellenius, B.H. Reduction of negative skin friction with bitumen coated slip layers / Discussion American Society of Civil Engineers, ASCE // Journal of the Geotechnical Division, Vol. 101, GT4, - 1975. - pp. 412-414.
93. Fellenius, B.H. Results from long-term measurement in piles of drag load and downdrag // Canadian Geotechnical Journal, vol. 43, no. 4, - 2006. - pp. 409–430.
94. Garlanger, J.E. Proceedings of a symposium on downdrag of piles / J.E. Garlanger, T.W. Lambe // Tech. Rep., MIT, Cambridge, Mass, USA, - 1973. – pp. 73-56.
95. Gary, L. Kuhns. Downdrag in Pile Design: The Positive Aspects of Negative Skin Friction // ASCE, From research to Practice Geotechnical Engineering Congress., 2008.
96. Hanna, A.M. Drag force on single piles in clay subjected to surcharge loading/ A.M. Hanna, A. Sharif // International Journal of Geomechanics, vol. 6, no. 2, - 2006. - pp. 89–96.
97. Jeong, S., Nonlinear three dimensional analysis of downdrag on pile groups [Ph.D. thesis], Texas A & M University, College Station, Tex, USA, 1992.
98. Johannessen, B.L. Measurement of the compression of steel pile to rock due to settlement of the surrounding clay // Proc. of the 6th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering vol. 2, - 1965. – pp. 261–264.
99. Kong, G.Q. Evaluation of group effect of pile group under dragload embedded in clay / G.Q. Kong, Q. Yang, P.Y. Zheng, M.T. Luan Journal of Central South University of Technology, vol. 16, no. 3, - 2009. - pp. 503–512
100. Lam, S.Y. Comparative study of Y-shaped and circular floating piles in consolidating clay/ S.Y. Lam, H. Liu, X. Ding // Can. Geotech. J. 53, - 2016. - pp 1483–1494.
101. Lam, S. Shielding piles from downdrag in consolidating ground / S. Lam, C.W.W. Ng, H. Poulos // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 139, no. 6, - 2013. - pp. 956–968.

102. Lam, S.Y., et al. Centrifuge and numerical modeling of axial load effects on piles in consolidating ground // Canadian Geotechnical Journal 46.1, -2009. - pp 10-24.
103. Le Phuong. The influence of negative skin friction phenomenon on reinforced concrete pile design for high-rise building in district 7 – HCM city / Le Phuong, A.T. Truong, N.A. Dao // Journal of Science and Technology Education, No. 19, 2011.
104. Lee, C.H. Negative skin friction on piles due to lowering of groundwater table/ C.H. Lee, C.R. Chen // Journal of the southeast Asian geotechnical society, - 2003. - pp.13-25.
105. Lee, C.J. Development of downdrag on piles and pile groups in consolidating soil/ C.J. Lee, C.W.W. Ng // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 130, no. 9, - 2004. - pp. 905–914.
106. Lee, C.J. Numerical modelling of group effects on the distribution of dragloads in pile foundations/ C.J. Lee, M.D. Bolton, A. Al-Tabbaa // Geotechnique, vol. 52, no. 5, - 2002. - pp. 325–335.
107. Lee, J. Three-dimensional analysis of bearing behavior of piled raft on soft clay/ J. Lee, Y. Kim, S. Jeong // Computer Geotech. 37, - 2010. – pp. 103–114.
108. Leung, C.F. Behavior of pile subject to negative skin friction and axial load/ C.F. Leung, B.K. Liao, Y.K. Chow, R.F. Shen, Y.C. Kog // Soils and Foundations, 44, - 2004. – pp. 17-26.
109. Little, J.A. Downdrag on piles: review and recent experimentation // Proceedings of the Conference on Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, Geotechnical Special Publication, New York, NY, USA, - June 1994 - pp. 1805–1826.
110. Lu, W.T. In-situ tests on negative friction resistance of abutment piles in soft soil/ W.T. Lu, W.M. Leng, Y.H. Wang // Chinese Journal of Geotechnical Engineering, vol. 27, no. 6, -2005. - pp. 642–645.
111. Lv, Yaru, et al. Geometric Effects on Piles in Consolidating Ground: Centrifuge and Numerical Modeling // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, - 2017. – pp.143.

112. Lv, Yaru, et al. Comparative study of Y-shaped and circular floating piles in consolidating clay // *Canadian Geotechnical Journal* 53.9, -2016. – pp. 1483-1494.
113. Lv, Yaru, et al. Mechanism of Downdrag for Floating H-Pile Subjected to Surcharge. *Soil Mechanics & Foundation Engineering* 54.2. – 2017.
114. Meyerhof, G.G. Bearing capacity of rigid piles under eccentric and inclined loads/ G.G. Meyerhof, V.V.R.H. Sastry // *Canadian geotechnical journal*.- 1985. - vol. 22. - No 3. - P.267-276.
115. Randolph, M.F., Wroth, C.P. Analysis of deformation of vertically loaded piles/ M.F. Randolph, C.P. Wroth // *Journal of the Geotechnical Engineering ASCE* 104 (GT12), - 1978). – pp.1465–1488.
116. *Manuals Plaxis 2D Foundation* / A.Abalkema Publishers, 2001.
117. Maugeri, M. Settlement of a piled foundation due to negative skin friction: a case history / M. Maugeri, F. Castelli, and E. Motta // 14th ICSMF. Vol. 1111. – 1997.
118. Mindlin, R.D. Forces at a point in the interior of a semi-infinite solid// *Physics*, vol.7, - 1936. – pp. 195-202.
119. Moormann, C. Effect of groundwater-drawdown on deep foundations/ C. Moormann, R. Katzenbach // *Proc. 4th International Symposium Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, Ghent, - 2003. - pp. 401-408.
120. Moormann, C. Geotechnical long-term monitoring: impact of groundwater-lowering on adjacent high-rise buildings // *Proc. 6th International Symposium Field Measurements in Geomechanics*, Oslo, - 2003. - pp. 237-244.
121. Muir Wood, D., 2004. *Geotechnical modelling*.
122. Nelson, K. Modelling of negative skin friction on bored piles in clay. [Text] Master of Science Thesis in the Master' s Programme Infrastructure and Environmental Engineering / Nelson Kiprotich. – Sweden, 2015. - 52p.
123. Ng, C.W.W. Effects of tip location and shielding on piles in consolidating ground / C.W.W. Ng, H.G. Poulos, V.S.H. Chan, S.S.Y. Lam, G.C.Y. Chan // *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, vol. 134, no. 9, - 2008. - pp. 1245–1260.

124. Nguyen, V.V. Research, analysis, assessment of soil's negative friction on reinforced concrete piles in urban area central of Hanoi city / V.V. Nguyen, M.L. Tran, H.P. Nguyen // *Journal of Construction Science and Technology*, issue 4, 2019.
125. Okabe, T. Large negative friction and friction-free pile methods // *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Japan, - 1977. - pp. 679–682..
126. Poulos, H. G. A practical design approach for piles with negative friction // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 161, no. 1, - 2008. - pp. 19–27.
127. Poulos, H. G. Piles subjected to negative friction: A procedure for design // *Geotech. Engineering.*, 28(1), - 1997. – pp. 23–44.
128. Riley, F.S. Direct determination of the time and stress dependency of the artesian storage coefficient (abs.) // *Geol. Soc. America Ann. Mtg.*, 81st, Mexico City 1968, Program. - 1968. - p.248.
129. Shamsheer, P. Pile foundation in engineering practice / P. Shamsheer, D.S. Hari // *John Wiley and Sons, Inc*, 1990. - 768p.
130. Shen, W.Y. A variational solution for downdrag force analysis of pile groups / W.Y. Shen, C.I. The // *International Journal of Geomechanics*, vol. 2, No1. - 2002. - pp. 75–91.
131. Shibata, T. Model test and analysis of negative skin friction acting on piles / T. Shibata, H. Sekiguchi, H. Yukitomo // *Soils and Foundations*, vol. 22, no. 2, -1982. - pp. 29–39.
132. Sujawat Singh Rituraj. Negative skin friction on piles: State of the art / Sujawat Singh Rituraj, B. Giridhar Rajesh // *Advances in Geo-Sciences and Geo-Structures*, Springer Singapore, DOI:10.1007/978-981-16-1993-9_34, - 2022. – pp. 323-335.
133. Tah, C.I. Analysis of downdrag on pile groups/ C.I. Tah, K.S. Wong// *Geotechnique*, vol. 45, no. 2, - 1995. - pp. 191–207.
134. TCXD 10304:2014. Вьетнамский государственный строительный стандарт для свайных фундаментов. (По-Вьетнамски).

135. TCXD 245:2000. Вьетнамский государственный строительный стандарт для оснований и фундаментов. (По-Вьетнамски).
136. Terzaghi, K. Simplified soil test for subgrade and their physical significance. // *Public Roads* 7. -1926. - p.153-162.
137. Toma, T.M. A model study of negative skin friction on a fixed base pile in soft clay [Ph.D. thesis], Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland, 1989.
138. Tran Vo Nhiem. Terms de surface de la force portante limite d'une foundation a charge inclinee excentree par la methode du cointrangulaire minimal: these du doctorat de specilides/ Tran Vo Nhiem. - Grenoble, 1965.
139. Walker, L. K. Dragdown on coated and uncoated piles / L.K. Walker, P.L. Darvall // *Proc. 8th ICSMFE, Moscow, Vol. 2, -1973. - pp. 257-262.*
140. Wang, L.M. A field testing study on negative skin friction along piles induced by seismic subsidence of loess / L.M. Wang, J.J. Sun, X.F. Huang, S.H. Xu, Y.C. Shi, R.D. Qiu // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, No1, - 2011. - pp. 45–58.
141. Yao, W. Characteristics of negative skin friction for superlong piles under surcharge loading / W. Yao, Y. Liu, J. Chen // *International Journal of Geomechanics*, vol. 12, No2, - 2012. - pp. 90–97.
142. Zeevaert, L. Reduction of point bearing capacity of piles because of negative skin friction // *Proceedings of 1st American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, 3, - 1959. – pp. 1145-1152.*
143. Zhou, W. Development of Negative Skin Friction of Piles on Soft Ground / W. Zhou, R. Chen, Y. Chen // *Foundation Analysis and Design: Innovative Methods, ASCE, - 2006.*
144. Znamenskii, V.V. A comparative study of ordinary piles and superlong piles in consolidating soil / V.V. Znamenskii, O. Hegazy // *Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – T.1425. - №1. – 12071p.*
145. 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. – T.1030. - №1. - 12096p.*

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Результаты расчета зависимости положения «нулевой точки» ($z_0, z_0/L_{CB}$) (без учета нагрузки на голове свай)

D_{CB} (М)	L_{CB} (М)	$E_{пес}/E_{гп}$	$h_w/L_{CB}=0,2$		$h_w/L_{CB}=0,4$		$h_w/L_{CB}=0,6$		$h_w/L_{CB}=0,8$		$h_w/L_{CB}=1,0$	
			z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}
0,6	15,0	1	11,53	0,769	12,38	0,825	12,84	0,856	13,13	0,875	13,22	0,881
		2	12,38	0,825	13,13	0,875	13,50	0,900	13,69	0,913	13,78	0,919
		3	13,03	0,869	13,69	0,913	13,88	0,925	13,97	0,931	14,06	0,938
		4	13,22	0,881	13,78	0,919	14,06	0,938	14,16	0,944	14,25	0,950
	17,5	1	13,07	0,747	13,91	0,795	14,42	0,824	14,92	0,853	14,98	0,856
		2	13,97	0,798	14,86	0,849	15,26	0,872	15,59	0,891	15,65	0,894
		3	14,58	0,833	15,37	0,878	15,71	0,897	15,99	0,913	16,10	0,920
		4	15,09	0,862	15,71	0,897	16,04	0,917	16,27	0,929	16,32	0,933
	20,0	1	14,72	0,736	15,45	0,772	16,07	0,803	16,57	0,829	16,85	0,843
		2	15,67	0,784	16,63	0,831	17,14	0,857	17,47	0,874	17,64	0,882
		3	16,40	0,820	17,25	0,862	17,70	0,885	18,03	0,902	18,20	0,910
		4	16,74	0,837	17,70	0,885	18,03	0,902	18,32	0,916	18,48	0,924
0,8	15,0	1	11,48	0,765	12,30	0,820	12,75	0,850	12,98	0,865	13,05	0,870
		2	12,15	0,810	13,05	0,870	13,35	0,890	13,65	0,910	13,73	0,915
		3	12,83	0,855	13,50	0,900	13,73	0,915	13,73	0,915	13,80	0,920
		4	13,28	0,885	13,80	0,920	13,95	0,930	14,03	0,935	14,18	0,945
	17,5	1	13,35	0,763	14,11	0,806	14,63	0,836	15,09	0,862	15,24	0,871
		2	14,33	0,819	15,09	0,862	15,46	0,884	15,84	0,905	15,92	0,909
		3	14,86	0,849	15,54	0,888	15,92	0,909	16,22	0,927	16,29	0,931
		4	15,24	0,871	15,92	0,909	16,14	0,922	16,44	0,940	16,52	0,944
	20,0	1	15,00	0,750	15,82	0,791	16,34	0,817	16,87	0,843	17,16	0,858
		2	16,05	0,802	16,87	0,843	17,31	0,866	17,76	0,888	18,06	0,903
		3	16,64	0,832	17,46	0,873	17,91	0,896	18,21	0,910	18,43	0,922
		4	17,09	0,855	17,84	0,892	18,21	0,910	18,51	0,925	18,73	0,937
1,0	15,0	1	11,72	0,781	12,47	0,831	12,94	0,863	13,22	0,881	13,22	0,881
		2	12,47	0,831	12,84	0,856	13,22	0,881	13,50	0,900	13,69	0,913
		3	12,75	0,850	13,41	0,894	13,69	0,913	13,88	0,925	14,06	0,938
		4	12,84	0,856	13,59	0,906	13,88	0,925	14,16	0,944	14,25	0,950
	17,5	1	13,40	0,766	14,15	0,809	14,71	0,840	15,17	0,867	15,27	0,872
		2	14,34	0,819	15,17	0,867	15,55	0,888	15,92	0,910	16,01	0,915
		3	14,89	0,851	15,64	0,894	16,01	0,915	16,29	0,931	16,29	0,931
		4	15,36	0,878	16,01	0,915	16,29	0,931	16,48	0,941	16,57	0,947
	20,0	1	15,09	0,755	15,85	0,792	16,42	0,821	16,98	0,849	17,26	0,863
		2	15,94	0,797	16,98	0,849	17,45	0,873	17,83	0,892	18,11	0,906
		3	16,60	0,830	17,55	0,877	17,93	0,896	18,30	0,915	18,59	0,929
		4	17,26	0,863	17,93	0,896	18,30	0,915	18,59	0,929	18,87	0,943

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Результаты расчета максимальных осевых усилий в свае (N_{max}) и нагрузок на ее нижний конец (N_L) (без учета нагрузки на голове сваи)

$D_{св}$ (М)	$L_{св}$ (М)	$E_{пес}/E_{г.л.}$	$h_w/L_{св}=0,2$		$h_w/L_{св}=0,4$		$h_w/L_{св}=0,6$		$h_w/L_{св}=0,8$		$h_w/L_{св}=1,0$	
			N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)
0,6	15,0	1	488	312	607	403	673	449	691	474	689	498
		2	522	375	673	497	746	548	751	565	752	597
		3	571	446	742	566	783	598	797	606	817	609
		4	612	460	747	615	807	627	823	639	842	648
	17,5	1	904	505	1164	711	1318	825	1387	889	1391	896
		2	953	683	1297	918	1408	1061	1446	1125	1410	1091
		3	1024	799	1337	1059	1522	1217	1545	1226	1594	1296
		4	1087	873	1376	1090	1590	1313	1653	1357	1649	1368
	20,0	1	1074	555	1280	770	1541	959	1661	1040	1654	1065
		2	1120	842	1558	1091	1790	1284	1807	1388	1752	1401
		3	1226	971	1650	1270	1900	1476	2027	1592	1953	1651
		4	1392	1070	1708	1401	1976	1616	2105	1724	2021	1725
0,8	15,0	1	583	363	728	474	804	533	826	561	835	574
		2	575	446	809	592	817	659	915	695	930	720
		3	668	524	847	657	886	729	974	804	976	807
		4	712	578	876	670	963	772	1004	852	1008	857
	17,5	1	719	438	919	597	1038	684	1087	726	1112	765
		2	798	570	1019	749	1146	856	1200	912	1210	914
		3	819	660	1080	845	1195	966	1266	1006	1272	1018
		4	859	718	1116	901	1235	1035	1307	1065	1317	1084
	20,0	1	856	488	1103	671	1271	796	1352	862	1392	903
		2	943	633	1225	867	1373	980	1499	1097	1530	1130
		3	958	731	1294	976	1487	1144	1582	1230	1615	1268
		4	1000	803	1304	1015	1541	1230	1636	1319	1670	1355
1,0	15,0	1	454	325	573	413	683	481	688	486	704	505
		2	490	326	613	424	695	511	700	512	705	521
		3	495	373	649	496	721	546	759	584	784	602
		4	499	383	679	515	726	598	802	627	806	649
	17,5	1	601	385	761	511	859	581	913	642	933	673
		2	650	472	850	635	956	721	1002	777	1026	817
		3	667	509	892	701	990	789	1040	839	1073	889
		4	713	603	911	734	1030	863	1080	879	1098	901
	20,0	1	708	427	918	591	1057	695	1126	752	1154	778
		2	708	525	1017	747	1162	869	1233	932	1271	960
		3	766	611	1073	836	1219	976	1308	1038	1340	1078
		4	844	692	1078	909	1272	1049	1346	1102	1382	1130

ПРИЛОЖЕНИЕ В – Результаты расчета зависимости положения «нулевой точки» ($z_0, z_0/L_{CB}$) (с учетом нагрузки на голове свай)

D_{CB} (М)	L_{CB} (М)	P_{CB}/F_d	$E_{пес}/E_{гп}$	$h_w/L_{CB}=0,2$		$h_w/L_{CB}=0,4$		$h_w/L_{CB}=0,6$		$h_w/L_{CB}=0,8$		$h_w/L_{CB}=1,0$	
				z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}
0,6	15,0	0,4	1	9,75	0,650	11,25	0,750	12,00	0,800	12,38	0,825	12,38	0,825
			2	10,86	0,724	12,09	0,806	12,71	0,847	13,04	0,869	13,10	0,873
			3	11,81	0,788	12,84	0,856	13,22	0,881	13,41	0,894	13,69	0,913
			4	12,09	0,806	12,87	0,858	13,49	0,899	13,66	0,910	13,77	0,918
		0,6	1	9,66	0,644	11,06	0,738	11,81	0,788	12,19	0,813	12,19	0,813
			2	10,50	0,700	11,63	0,775	12,54	0,836	12,75	0,850	13,03	0,869
			3	11,72	0,781	12,75	0,850	13,03	0,869	13,22	0,881	13,50	0,900
			4	11,47	0,765	12,75	0,850	13,15	0,877	13,32	0,888	13,71	0,914
		0,8	1	9,47	0,631	10,88	0,725	11,72	0,781	12,09	0,806	12,09	0,806
			2	10,30	0,687	11,70	0,780	12,54	0,836	12,71	0,847	12,93	0,862
			3	11,25	0,750	12,20	0,813	12,76	0,851	13,15	0,877	13,43	0,896
			4	11,42	0,761	12,75	0,850	13,10	0,873	13,22	0,881	13,66	0,910
	17,5	0,4	1	11,22	0,641	12,68	0,724	13,52	0,772	14,08	0,805	14,19	0,811
			2	12,73	0,728	14,02	0,801	14,70	0,840	15,20	0,869	15,26	0,872
			3	13,52	0,772	14,75	0,843	15,31	0,875	15,54	0,888	15,82	0,904
			4	14,08	0,805	14,92	0,853	15,54	0,888	15,87	0,907	16,10	0,920
		0,6	1	10,88	0,622	12,34	0,705	13,29	0,760	13,85	0,792	13,97	0,798
			2	12,28	0,702	13,63	0,779	14,42	0,824	14,98	0,856	15,09	0,862
			3	13,18	0,753	14,42	0,824	15,03	0,859	15,54	0,888	15,59	0,891
			4	13,63	0,779	14,92	0,853	15,48	0,885	15,87	0,907	15,99	0,913
		0,8	1	10,60	0,606	12,17	0,695	13,18	0,753	13,74	0,785	13,85	0,792
			2	12,00	0,686	13,52	0,772	14,30	0,817	14,86	0,849	14,98	0,856
			3	12,96	0,740	14,25	0,814	14,92	0,853	15,43	0,881	15,54	0,888
			4	13,35	0,763	14,75	0,843	15,37	0,878	15,76	0,901	15,87	0,907
20,0	0,4	1	12,58	0,629	14,05	0,702	15,00	0,750	15,73	0,787	16,07	0,803	
		2	14,16	0,708	15,39	0,770	16,35	0,817	16,91	0,846	17,25	0,862	
		3	15,11	0,756	16,46	0,823	17,08	0,854	17,53	0,876	17,81	0,890	
		4	15,79	0,789	16,97	0,848	17,58	0,879	17,98	0,899	18,20	0,910	
	0,6	1	11,80	0,590	13,37	0,669	14,61	0,730	15,34	0,767	15,79	0,789	
		2	13,48	0,674	14,78	0,739	16,01	0,801	16,63	0,831	16,97	0,848	
		3	14,72	0,736	16,07	0,803	16,74	0,837	17,36	0,868	17,64	0,882	
		4	15,45	0,772	16,40	0,820	17,25	0,862	17,75	0,888	18,09	0,905	
	0,8	1	11,52	0,576	13,09	0,655	14,27	0,714	15,28	0,764	15,67	0,784	
		2	12,53	0,626	14,55	0,728	15,79	0,789	16,52	0,826	16,85	0,843	
		3	13,65	0,683	15,79	0,789	16,52	0,826	17,19	0,860	17,47	0,874	
		4	14,16	0,708	16,01	0,801	16,90	0,845	17,64	0,882	17,99	0,899	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В – Результаты расчета зависимости
положения «нулевой точки» ($z_0, z_0/L_{CB}$) (с учетом нагрузки на голове сваи)

D_{CB} (М)	L_{CB} (М)	P_{CB}/F_d	$E_{инес}/E_{ггЛ}$	$h_w/L_{CB}=0,2$		$h_w/L_{CB}=0,4$		$h_w/L_{CB}=0,6$		$h_w/L_{CB}=0,8$		$h_w/L_{CB}=1,0$	
				z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}
0,8	15,0	0,4	1	9,38	0,625	10,95	0,730	11,78	0,785	12,15	0,810	12,15	0,810
			2	10,73	0,715	12,08	0,805	12,75	0,850	13,05	0,870	13,05	0,870
			3	11,18	0,745	12,30	0,820	12,90	0,860	13,41	0,894	13,50	0,900
			4	11,70	0,780	12,68	0,845	13,35	0,890	13,65	0,910	13,73	0,915
		0,6	1	9,30	0,620	10,73	0,715	11,55	0,770	11,93	0,795	11,93	0,795
			2	10,50	0,700	11,85	0,790	12,60	0,840	12,83	0,855	12,90	0,860
			3	10,95	0,730	12,15	0,810	12,75	0,850	13,13	0,875	13,50	0,900
			4	11,48	0,765	12,53	0,835	13,13	0,875	13,43	0,895	13,65	0,910
		0,8	1	8,93	0,595	10,50	0,700	11,48	0,765	11,63	0,775	11,70	0,780
			2	10,13	0,675	11,55	0,770	12,53	0,835	12,75	0,850	12,75	0,850
			3	10,95	0,730	12,08	0,805	12,75	0,850	13,13	0,875	13,43	0,895
			4	11,40	0,760	12,45	0,830	13,05	0,870	13,35	0,890	13,65	0,910
	17,5	0,4	1	10,33	0,591	12,07	0,690	12,97	0,741	13,80	0,789	13,96	0,797
			2	11,92	0,681	13,50	0,772	14,33	0,819	14,94	0,853	15,01	0,858
			3	12,75	0,728	14,26	0,815	14,94	0,853	15,46	0,884	15,54	0,888
			4	13,35	0,763	14,71	0,841	15,39	0,879	15,77	0,901	15,92	0,909
		0,6	1	10,26	0,586	11,77	0,672	12,90	0,737	13,58	0,776	13,65	0,780
			2	11,39	0,651	13,20	0,754	14,03	0,802	14,71	0,841	14,78	0,845
			3	12,52	0,716	14,03	0,802	14,78	0,845	15,31	0,875	15,39	0,879
			4	12,97	0,741	14,48	0,828	15,16	0,866	15,61	0,892	15,77	0,901
		0,8	1	9,50	0,543	11,47	0,655	12,60	0,720	13,35	0,763	13,43	0,767
			2	11,24	0,642	12,97	0,741	13,96	0,797	14,56	0,832	14,63	0,836
			3	12,22	0,698	13,80	0,789	14,63	0,836	15,16	0,866	15,31	0,875
			4	12,67	0,724	14,33	0,819	15,09	0,862	15,54	0,888	15,69	0,897
	20,0	0,4	1	11,19	0,560	13,36	0,668	14,48	0,724	15,30	0,765	15,82	0,791
			2	13,06	0,653	14,93	0,746	15,90	0,795	16,57	0,828	17,02	0,851
			3	14,03	0,702	15,82	0,791	16,64	0,832	17,24	0,862	17,61	0,881
			4	14,70	0,735	16,42	0,821	17,16	0,858	17,69	0,884	18,06	0,903
0,6		1	11,05	0,552	12,91	0,646	14,18	0,709	15,08	0,754	15,52	0,776	
		2	12,39	0,619	14,55	0,728	15,60	0,780	16,34	0,817	16,79	0,840	
		3	13,81	0,690	15,45	0,772	16,42	0,821	17,09	0,855	17,46	0,873	
		4	14,40	0,720	16,12	0,806	16,94	0,847	17,54	0,877	17,84	0,892	
0,8		1	10,82	0,541	12,54	0,627	13,88	0,694	14,78	0,739	15,22	0,761	
		2	12,16	0,608	14,33	0,716	15,37	0,769	16,19	0,810	16,57	0,828	
		3	13,36	0,668	15,30	0,765	16,19	0,810	16,94	0,847	17,24	0,862	
		4	13,96	0,698	15,90	0,795	16,79	0,840	17,39	0,869	17,76	0,888	

ОКОНЧАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В – Результаты расчета зависимости положения
«нулевой точки» ($z_0, z_0/L_{CB}$) (с учетом нагрузки на голове сваи)

D_{CB} (М)	L_{CB} (М)	P_{CB}/F_d	$E_{инес}/E_{ггЛ}$	$h_w/L_{CB}=0,2$		$h_w/L_{CB}=0,4$		$h_w/L_{CB}=0,6$		$h_w/L_{CB}=0,8$		$h_w/L_{CB}=1,0$	
				z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}	z_0 (М)	z_0/L_{CB}
1.0	15,0	0,4	1	8,55	0,570	10,22	0,681	11,34	0,756	11,81	0,788	12,28	0,819
			2	10,03	0,669	11,72	0,781	12,19	0,813	12,94	0,863	13,31	0,888
			3	10,97	0,731	12,19	0,813	12,84	0,856	13,41	0,894	13,69	0,913
			4	11,44	0,763	12,56	0,838	13,31	0,888	13,69	0,913	13,88	0,925
		0,6	1	7,88	0,525	9,84	0,656	11,25	0,750	11,72	0,781	11,91	0,794
			2	9,38	0,625	11,16	0,744	12,19	0,813	12,84	0,856	13,22	0,881
			3	10,50	0,700	12,09	0,806	12,56	0,838	13,41	0,894	13,59	0,906
			4	11,25	0,750	12,47	0,831	13,03	0,869	13,59	0,906	13,78	0,919
		0,8	1	7,78	0,519	9,75	0,650	10,97	0,731	11,63	0,775	11,91	0,794
			2	9,28	0,619	10,97	0,731	12,09	0,806	12,56	0,838	13,13	0,875
			3	10,22	0,681	11,91	0,794	12,38	0,825	12,94	0,863	13,50	0,900
			4	10,97	0,731	12,38	0,825	12,94	0,863	13,31	0,888	13,69	0,913
	17,5	0,4	1	9,68	0,553	11,73	0,670	12,85	0,734	13,50	0,771	13,65	0,780
			2	11,36	0,649	13,22	0,755	13,68	0,782	14,71	0,840	14,80	0,846
			3	12,57	0,718	13,96	0,798	14,71	0,840	15,36	0,878	15,17	0,867
			4	13,22	0,755	14,52	0,830	15,36	0,878	15,82	0,904	15,92	0,910
		0,6	1	9,40	0,537	11,54	0,660	12,47	0,713	13,13	0,750	13,31	0,761
			2	11,17	0,638	13,13	0,750	13,68	0,782	14,43	0,824	14,43	0,824
			3	12,10	0,691	13,78	0,787	14,52	0,830	14,80	0,846	15,17	0,867
			4	13,13	0,750	14,52	0,830	15,17	0,867	15,64	0,894	15,73	0,899
		0,8	1	9,22	0,527	11,26	0,644	12,29	0,702	12,94	0,739	13,03	0,745
			2	10,61	0,606	12,85	0,734	13,59	0,777	14,06	0,803	13,96	0,798
			3	11,54	0,660	13,78	0,787	14,34	0,819	14,80	0,846	15,08	0,862
			4	12,66	0,723	14,24	0,814	15,17	0,867	15,55	0,888	15,64	0,894
	20,0	0,4	1	10,66	0,533	12,55	0,627	13,87	0,693	14,92	0,746	15,38	0,769
			2	12,45	0,623	14,34	0,717	15,57	0,778	16,32	0,816	16,70	0,835
			3	13,30	0,665	15,47	0,774	16,42	0,821	16,98	0,849	17,45	0,873
			4	14,25	0,712	15,94	0,797	16,89	0,844	17,45	0,873	17,83	0,892
0,6		1	7,55	0,377	12,64	0,632	13,96	0,698	14,91	0,745	15,09	0,755	
		2	12,36	0,618	14,06	0,703	15,19	0,759	15,94	0,797	16,51	0,825	
		3	12,93	0,646	14,91	0,745	16,04	0,802	16,79	0,840	17,17	0,859	
		4	13,96	0,698	15,85	0,792	16,51	0,825	17,26	0,863	17,64	0,882	
0,8		1	7,55	0,377	12,36	0,618	13,77	0,689	14,81	0,741	15,19	0,759	
		2	11,42	0,571	13,96	0,698	15,19	0,759	15,66	0,783	16,13	0,807	
		3	12,08	0,604	14,91	0,745	15,85	0,792	16,60	0,830	16,98	0,849	
		4	12,74	0,637	15,47	0,774	16,42	0,821	16,98	0,849	17,26	0,863	

ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Результаты расчета максимальных осевых усилий в свае (N_{max}) и нагрузок на ее нижний конец (N_L) (с учетом нагрузки на голове сваи)

$D_{св}$ (М)	$L_{св}$ (М)	$P_{св}/F_d$	$E_{пес}/E_{гил}$	$h_w/L_{св}=0,2$		$h_w/L_{св}=0,4$		$h_w/L_{св}=0,6$		$h_w/L_{св}=0,8$		$h_w/L_{св}=1,0$	
				N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)
0,6	15,0	0,4	1	910	637	1057	735	1140	808	1173	843	1186	855
			2	1065	712	1334	953	1496	1090	1611	1198	1615	1208
			3	1035	807	1187	954	1570	1206	1676	1222	1707	1238
			4	1196	930	1454	1152	1653	1324	1744	1226	1743	1398
		0,6	1	1135	836	1313	980	1381	1015	1421	1055	1421	1072
			2	1207	969	1394	1108	1492	1176	1519	1202	1514	1189
			3	1252	1028	1447	1184	1536	1242	1576	1348	1650	1314
			4	1386	1148	1717	1412	1892	1588	1811	1457	2027	1663
		0,8	1	1383	1066	1559	1194	1647	1242	1681	1274	1688	1288
			2	1476	1087	1816	1436	2031	1628	2124	1679	2141	1665
			3	1511	1264	1918	1592	2112	1755	2202	1809	2243	1824
			4	1611	1366	1973	1671	2119	1791	2258	1873	2293	1911
	17,5	0,4	1	1337	759	1616	1009	1812	1156	1897	1239	1893	1250
			2	1469	1018	1804	1320	2009	1506	2074	1589	2061	1603
			3	1538	1160	1906	1490	2114	1686	2199	1842	2205	1781
			4	1580	1271	1974	1620	2185	1811	2261	1950	2248	1946
		0,6	1	1546	930	1885	1222	2081	1394	2168	1455	2190	1486
			2	1679	1157	2063	1533	2270	1706	2370	1811	2378	1811
			3	1751	1330	2170	1712	2382	1906	2479	2022	2490	2016
			4	1725	1472	2243	1826	2464	2080	2554	2130	2571	2144
		0,8	1	1820	1195	2167	1527	2366	1657	2450	1765	2470	1754
			2	1919	1501	2348	1865	2561	2006	2657	2087	2677	2113
			3	2042	1641	2446	2041	2668	2242	2768	2268	2783	2289
			4	2012	1739	2519	2166	2743	2366	2843	2411	2854	2416
20,0	0,4	1	1552	835	1834	1163	2136	1325	2269	1414	2309	1450	
		2	1684	1156	1922	1517	2389	1787	2471	1896	2551	1923	
		3	1787	1362	2238	1799	2520	2050	2614	2114	2555	2054	
		4	1846	1521	2282	1971	2609	2249	2762	2356	2734	2301	
	0,6	1	1743	948	2035	1398	2433	1550	2513	1668	2639	1734	
		2	1896	1335	2119	1733	2674	2033	2791	2150	2829	2244	
		3	2055	1527	2521	2072	2718	2376	2980	2464	2988	2491	
		4	2136	1694	2357	2131	2835	2626	3015	2612	3085	2629	
	0,8	1	2056	1243	2257	1606	2520	1825	2825	1992	2916	2027	
		2	1947	1513	2535	2066	2917	2461	3103	2517	3135	2544	
		3	2111	1809	2842	2380	2999	2747	3247	2838	3281	2854	
		4	2092	1790	2555	2527	2935	2667	3388	2996	3437	3012	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Г – Результаты расчета максимальных осевых усилий в свае (N_{max}) и нагрузок на ее нижний конец (N_L) (с учетом нагрузки на голове сваи)

D_{cb} (М)	L_{cb} (М)	P_{cb}/F_d	$E_{нec}/E_r$	$h_w/L_{cb}=0,2$		$h_w/L_{cb}=0,4$		$h_w/L_{cb}=0,6$		$h_w/L_{cb}=0,8$		$h_w/L_{cb}=1,0$	
				N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)
0,8	15,0	0,4	1	1367	1027	1534	1157	1639	1224	1679	1272	1686	1293
			2	1339	1073	1606	1328	1737	1406	1772	1460	1786	1477
			3	1387	1168	1616	1366	1742	1449	1822	1501	1837	1503
			4	1421	1215	1643	1406	1861	1591	1887	1595	1876	1541
		0,6	1	1781	1443	1982	1571	2087	1649	2130	1675	2132	1685
			2	1858	1604	2017	1800	2208	1865	2186	1834	2230	1872
			3	1861	1641	2036	1807	2283	1911	2269	1949	2309	1940
			4	1869	1702	2064	1936	2287	1992	2302	2007	2341	1964
		0,8	1	2168	1942	2426	2019	2542	2073	2498	2097	2560	2108
			2	2315	2100	2542	2264	2638	2354	2672	2373	2686	2384
			3	2308	2282	2608	2369	2698	2429	2722	2464	2733	2483
			4	2401	2290	2651	2480	2769	2551	2732	2585	2752	2596
	17,5	0,4	1	1554	1110	1772	1321	1819	1338	2029	1477	2041	1486
			2	1677	1314	1932	1567	2095	1674	2175	1732	2187	1744
			3	1744	1444	2013	1707	2179	1839	2254	1875	2266	1882
			4	1776	1544	2063	1815	2237	1936	2291	1967	2322	1981
		0,6	1	2049	1632	2291	1814	2448	1908	2529	1965	2538	1962
			2	2104	1786	2431	2093	2560	2191	2662	2240	2676	2248
			3	2202	1916	2513	2224	2693	2352	2763	2411	2780	2420
			4	2201	2009	2571	2346	2745	2473	2820	2514	2834	2504
		0,8	1	2391	2073	2794	2314	2952	2411	3032	2439	3048	2446
			2	2590	2332	2936	2595	3113	2707	3193	2744	3208	2765
			3	2700	2474	3025	2781	3203	2877	3285	2934	3301	2924
			4	2702	2530	3083	2886	3254	3012	3332	3046	3346	3049
	20,0	0,4	1	1737	1118	2074	1415	2246	1570	2360	1621	2436	1685
			2	1907	1392	2241	1726	2453	1890	2572	1981	2631	2021
			3	1988	1526	2333	1896	2564	2087	2676	2165	2734	2213
			4	2020	1630	2404	2032	2640	2227	2747	2300	2813	2342
0,6		1	2344	1738	2622	1940	2844	2095	2959	2169	3016	2215	
		2	2359	1872	2806	2278	2987	2444	3150	2542	3180	2553	
		3	2528	2089	2874	2466	3141	2668	3267	2758	3316	2782	
		4	2556	2223	2975	2583	3200	2795	3337	2888	3392	2912	
0,8		1	2886	2351	3181	2502	3406	2614	3532	2685	3593	2728	
		2	2930	2543	3387	2851	3593	3015	3732	3094	3740	3109	
		3	3092	2752	3469	3104	3681	3211	3843	3330	3830	3341	
		4	3136	2828	3549	3203	3787	3360	3932	3470	3976	3497	

ОКОЧАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Г – Результаты расчета максимальных осевых усилий в свае (N_{max}) и нагрузок на ее нижний конец (N_L) (с учетом нагрузки на голове сваи)

D_{cb} (М)	L_{cb} (М)	P_{cb}/F_d	$E_{пес}/E_r$	$h_w/L_{cb}=0,2$		$h_w/L_{cb}=0,4$		$h_w/L_{cb}=0,6$		$h_w/L_{cb}=0,8$		$h_w/L_{cb}=1,0$	
				N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)	N_{max} (кН)	N_L (кН)
1,0	15,0	0,4	1	1604	1412	1800	1557	1903	1644	1951	1671	1993	1707
			2	1713	1492	1937	1636	2037	1713	2095	1764	2115	1769
			3	1816	1628	1993	1770	2123	1820	2145	1820	2172	1883
			4	1823	1669	2038	1822	2161	1873	2172	1883	2191	1884
		0,6	1	2339	2143	2512	2384	2648	2473	2698	2525	2702	2529
			2	2394	2246	2595	2430	2709	2540	2778	2599	2811	2630
			3	2457	2334	2658	2508	2756	2645	2857	2626	2865	2645
			4	2497	2434	2754	2549	2871	2626	2882	2732	2901	2789
		0,8	1	3042	2898	3230	3082	3354	3175	3418	3226	3442	3271
			2	3150	2988	3324	3100	3427	3188	3505	3309	3528	3360
			3	3152	2966	3361	3117	3452	3173	3540	3278	3564	3316
			4	3199	2986	3408	3126	3522	3200	3593	3280	3603	3474
	17,5	0,4	1	1975	1710	2226	1826	2352	1904	2416	1937	2424	1942
			2	2089	1946	2342	2047	2253	1903	2540	2180	2562	2188
			3	2203	2019	2407	2160	2516	2248	2613	2306	2464	2128
			4	2203	2077	2471	2251	2626	2338	2689	2343	2691	2343
		0,6	1	2717	2538	3028	2703	3121	2672	3192	2703	3221	2717
			2	2911	2778	3140	2887	3268	2959	3342	2961	3241	2831
			3	2914	2753	3216	3032	3343	3071	3215	2881	3431	3103
			4	3020	2827	3285	3056	3423	3116	3498	3158	3452	3133
		0,8	1	3527	3108	3714	3451	3836	3533	3939	3509	3961	3408
			2	3574	3120	3862	3548	4093	3809	3988	3639	3983	3488
			3	3657	3203	3952	3796	4157	3933	4226	3968	4239	3940
			4	3798	3410	4047	3915	4238	3938	4275	3955	4319	4028
20,0	0,4	1	2209	1837	2461	2045	2612	2137	2788	2247	2860	2278	
		2	2339	2011	2641	2353	2877	2469	2973	2548	2984	2577	
		3	2467	2254	2772	2482	2960	2655	3054	2726	3104	2738	
		4	2537	2295	2799	2617	3017	2777	3117	2839	3167	2852	
	0,6	1	2906	2741	3301	2953	3480	3058	3608	3069	3701	3163	
		2	3223	2978	3566	3373	3709	3434	3831	3483	3933	3522	
		3	3314	2913	3615	3480	3843	3636	3967	3695	4029	3663	
		4	3385	2958	3741	3537	3932	3657	4046	3787	4097	3798	
	0,8	1	3860	3393	4183	3916	4374	4041	4462	4017	4525	3996	
		2	4031	3544	4391	4239	4603	4408	4743	4452	4848	4381	
		3	4104	3595	4529	4410	4738	4547	4853	4724	4885	4655	
		4	4276	3803	4613	4586	4845	4606	4865	4758	4956	4708	

ПРИЛОЖЕНИЕ Д - Список публикаций автора по теме диссертационной работы

Список публикаций автора по теме диссертационной работы
Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

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.