

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Жайсамбаев Еркн Аскерович

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОДИНОЧНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ СВАИ
С ТЕРМОСТАБИЛИЗИРУЕМЫМ ОСНОВАНИЕМ,
ПРЕДСТАВЛЕННЫМ ОТТАЯВШИМИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМИ
ГРУНТАМИ**

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Краев Алексей Николаевич



ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1. Многолетнемерзлые грунты в качестве оснований объектов промышленного и гражданского назначения.....	11
1.2. История исследования мерзлых грунтов	13
1.3. Способы возведения промышленных и гражданских объектов на вечномерзлых грунтах	15
1.4. Основные причины разрушения промышленных и гражданских объектов, построенных на вечномерзлых грунтах.....	28
1.5. Выводы по главе 1	35
1.6. Обоснование выбранного направления работы.....	36
ГЛАВА 2. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОДЕЛИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ СВАИ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ	38
2.1. Цель и задачи лабораторных исследований	38
2.2. Экспериментальный стенд и контрольно-измерительное оборудование	40
2.3. Проведение лабораторных исследований.....	49
2.4. Анализ результатов лабораторных исследований	55
2.5. Выводы по главе 2.....	57
ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСАДКИ ОДИНОЧНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ СВАИ В ТЕРМОСТАБИЛИЗИРУЕМОМ ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ	58
3.1. Постановка задачи и анализ научно-технической литературы.....	58
3.2. Определение геометрических параметров мерзлого грунтового ядра, формирующегося вокруг сваи	59

3.3. Методика определения осадки сваи.....	83
3.3.1. Применение метода В.З. Власова к расчету упругого полупространства	85
3.3.2. Определение напряженно-деформированного состояния упругого основания при взаимодействии со свайей	90
3.3.3. Определение осадки сваи на втором участке при нелинейном деформировании грунта	99
3.4. Выводы по главе 3.....	100
ГЛАВА 4. НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СВАЙ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ.....	101
4.1. Цель и задачи натуральных исследований.....	101
4.2. Место проведения натурального исследования	102
4.3. Подготовка к проведению натурального исследования	105
4.4. Проведение и результаты натурального исследования	108
4.5. Выводы по главе 4.....	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	127
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	142

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Повышение объемов хозяйственной деятельности в криолитозоне требует увеличения скорости строительства объектов промышленного и гражданского назначения. Данные территории имеют сложные инженерно-геокриологические условия: сплошное либо островное распространение мерзлоты, локально оттаявшие или оттаивающие участки многолетнемерзлых грунтов (далее – ММГ) несливающегося типа, участки распространения мерзлоты с пониженным залеганием кровли мерзлых грунтов и другие. Ситуация осложняется происходящим увеличением приповерхностной температуры воздуха. На Ямале среднегодовая приповерхностная температура воздуха по климатическим наблюдениям увеличилась относительно нормативных значений на 2,2–2,5 °С за последние 50 лет. Однако, несмотря на происходящие изменения, климат Ямало-Ненецкого автономного округа остается суровым, резко континентальным, с продолжительной холодной зимой и коротким прохладным летом, что свидетельствует о целесообразности применения систем термостабилизации грунтов в данных природно-климатических условиях. Так, при проектировании, строительстве, усилении и реконструкции объектов на территориях с инженерно-геологическими условиями, представленными наличием оттаявших толщ мерзлоты с пониженным залеганием кровли мерзлых грунтов, не всегда возможно погрузить пяту сваи и, соответственно, нижнюю часть испарителя сезоннодействующего охлаждающего устройства (далее – СОУ) в надежный слой мерзлого грунта. Применение термостабилизации в данных грунтовых условиях способствует формированию вокруг сваи мерзлой грунтовой зоны (далее – мерзлое грунтовое ядро), геометрические размеры и положение которой будут определять эффективность работы сваи в термостабилизируемом основании.

В сложившейся ситуации *актуальной задачей* является исследование изменения температурного режима и его влияния на напряженно-деформированное состояние (далее – НДС) оттаявшего многолетнемерзлого основания с погруженной в него одиночной железобетонной сваей (далее – свая)

при термостабилизации околосвайного грунта вертикальными СОУ для корректной оценки несущей способности и осадки сваи в процессе ее статического нагружения.

Степень разработанности темы исследования. Научные труды Ю.А. Александрова, Н.А. Бучко, Ю.Я. Велли, А.С. Герасимова, М.Н. Гольдштейна, М.Д. Головки, С.Е. Гречищева, И.Е. Гурьянова, В.В. Докучаева, М.М. Дубины, В.Ф. Жукова, А.А. Кислицына, В.С. Колунина, В.Г. Кондратьева, Я.А. Кроника, Н.Б. Кутвицкой, В.П. Мельникова, В.Г. Меламеда, Ю.С. Миренбурга, М.А. Минкина, Н.Г. Мусакаева, В.О. Орлова, Л.С. Поденко, Г.П. Пустовойта, Д.В. Редозубова, Л.Т. Роман, М.И. Сумгина, Р.В. Чжана, Н.Ф. Федорова, Ю.Г. Федосеева, В.Н. Феклистова, Г.М. Фельдмана, Д.М. Шестернева, Э.Р. Эккерта, А.Л. Ястребова, S. Tabera, S.F. Thompsona, G.H. Watsona и других посвящены исследованиям мерзлых грунтов и прогнозу динамики их состояния.

Термостабилизация мерзлых грунтов рассмотрена в работах А.Г. Алексеева, Б.В. Бахолдина, Р.М. Баясана, Б.М. Блиера, Д.К. Блэча, С.Л. Вааза, Л.Л. Васильева, С.С. Вялова, С.И. Гапеева, Г.М. Долгих, Г.П. Кузьмина, Э.Л. Лонга, В.И. Макарова, С.Н. Окунева, И.Л. Пиоро, Н.Г. Трупака, С.М. Филипповского, Х.Р. Хакимова, М.М. Цинмана, F.D. Naunesa, I. Holubesa и других.

Исследованию теплопередачи в мерзлых грунтах аналитическими и численными методами посвящены работы Х. Азиза, Б.Г. Аксенова, Е.Р. Алексеева, Э.А. Бондарева, П.Н. Вабищевича, Э.Д. Ершова, В.А. Исакова, С.С. Кутателадзе, А.В. Лыкова, А.С. Патанкара, П.П. Пермьякова, И.И. Рожина, А.А. Самарского, Э. Сеттари, С.П. Степанова, А.Н. Тихонова, О.В. Чеснокова и других.

Вопросы взаимодействия инженерного сооружения с мерзлыми грунтами рассмотрены в работах И.А. Артюшенко, Е.С. Ашпиза, А.В. Брушкова, Я.Б. Горелика, П.И. Дыдышко, И.И. Железняк, Э.В. Ибрагимова, В.А. Ильичева, А.А. Коновалова, С.А. Кудрявцева, А.Л. Лязгина, Н.С. Никифоровой,

Л.Н. Нуждина, А.В. Павлова, В.Н. Парамонова, В.В. Пассека, В.Г. Порхаева, Я.А. Пронозина, В.В. Ремизова, И.И. Сахарова, Л.Н. Хрусталева, А.А. Цернанта, Н.А. Цытовича, Т.В. Шепитько, G.H. Johnstona и других.

Объект исследования: термостабилизируемое основание, представленное оттаявшими ММГ несливающегося типа, с погруженной в него сваей.

Предмет исследования: температурный режим и НДС оттаявшего многолетнемерзлого основания с погруженной в него сваей при термостабилизации вертикальными СОУ и действии вертикальных статических вдавливающих и выдергивающих нагрузок.

Цель диссертационной работы: выявление закономерностей изменения температурного режима и его влияния на НДС оттаявшего многолетнемерзлого основания с погруженной в него сваей при термостабилизации вертикальными СОУ и действии вертикальных статических вдавливающих и выдергивающих нагрузок.

Задачи исследования:

- проанализировать опыт строительства, эксплуатации и реконструкции объектов промышленного и гражданского назначения в криолитозоне с пониженным залеганием кровли ММГ;
- провести экспериментальные исследования для установления закономерностей изменения температурного режима, влияющего на НДС оттаявшего многолетнемерзлого основания с погруженной в него сваей, при термостабилизации СОУ и действии вертикальных статических вдавливающих и выдергивающих нагрузок;
- установить на основе экспериментальных исследований геометрические параметры формирующегося мерзлого грунтового ядра вокруг сваи и оценить динамику его развития в зависимости от конструктивных параметров СОУ, а также характеристик грунтов основания;

- выявить на основе натуральных экспериментальных исследований изменение несущей способности и осадки сваи, погруженной в оттаявшее многолетнемерзлое основание, при термостабилизации СОУ;
- разработать методику определения осадки сваи в термостабилизируемом основании, представленном оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами, с учетом экспериментально выявленных геометрических параметров мерзлого грунтового ядра, формирующегося вокруг сваи.

Научная новизна работы заключается в разработке методики определения осадки сваи с учетом экспериментально выявленных геометрических параметров мерзлого грунтового ядра, формирующегося вокруг сваи в результате работы СОУ, а также закономерностей изменения температурного режима, влияющего на НДС термостабилизируемого грунтового основания при статическом нагружении погруженной в него сваи.

В рамках исследования получены следующие **научные результаты:**

- предложены схемы термостабилизации оттаявшего основания с пониженной кровлей ММГ для увеличения несущей способности погруженной в него сваи;
- в результате выполненных экспериментальных исследований выявлены закономерности изменения температурного режима, влияющего на НДС оттаявшего многолетнемерзлого основания с погруженной в него сваем при термостабилизации СОУ и статическом нагружении сваи;
- установлены геометрические параметры мерзлого грунтового ядра, формирующегося вокруг сваи, в зависимости от конструктивных параметров СОУ и характеристик грунтов основания;
- в результате выполненных экспериментальных исследований получены зависимости изменения осадки и несущей способности сваи в оттаявшем многолетнемерзлом основании с пониженной кровлей ММГ при термостабилизации вертикальными СОУ;
- разработана методика определения осадки сваи, учитывающая экспериментально выявленные геометрические параметры мерзлого грунтового

ядра, формирующегося вокруг сваи, и закономерности изменения температуры грунта вокруг сваи;

– проведено численное моделирование и сопоставление с результатами натуральных экспериментов температурного режима и НДС термостабилизируемого основания с погруженной в него свайей при ее статическом нагружении.

Теоретическая значимость работы заключается в выявлении закономерностей изменения температурного режима, влияющего на НДС оттаявшего многолетнемерзлого основания несливающегося типа с погруженной в него свайей при термостабилизации СОУ и статическом нагружении сваи.

Практическая значимость работы состоит в предложении алгоритма устройства и этапов нагружения сваи в оттаявшем многолетнемерзлом основании, позволяющего совмещать процесс строительства и термостабилизации, а также в разработке методики определения осадки сваи, учитывающей параметры СОУ, характеристики грунтов основания и климатические условия района строительства.

Методология и методы исследования: методологической основой работы является анализ технической и научной литературы, посвященной механике деформационных процессов в мерзлых и оттаивающих грунтах, а также особенностям возведения объектов в условиях криолитозоны.

Личный вклад автора состоит в обосновании применения схем термостабилизации оттаявшего основания с пониженной кровлей ММГ для увеличения несущей способности погруженной в него сваи; проведении экспериментальных исследований и выявлении закономерностей изменения температурного режима, влияющего на НДС оттаявшего грунтового основания при термостабилизации СОУ и статическом нагружении сваи; разработке аналитической методики определения осадки сваи.

Положения, выносимые на защиту:

- обоснование схем термостабилизации оттаявшего основания с пониженной кровлей ММГ для увеличения несущей способности погруженной в него сваи;
- результаты экспериментальных исследований по установлению закономерностей изменения температурного режима, влияющего на НДС термостабилизируемого основания с погруженной в него сваем при приложении к ней статических вдавливающих и выдергивающих нагрузок;
- результаты экспериментальных исследований по установлению геометрических параметров мерзлого грунтового ядра, формируемого вокруг сваи в зависимости от характеристик СОУ и грунтов основания;
- результаты экспериментальных исследований изменения несущей способности и осадки сваи, погруженной в оттаявшее многолетнемерзлое основание, при термостабилизации СОУ;
- разработанная методика определения осадки сваи в термостабилизируемом основании, представленном оттаявшими ММГ несливающегося типа, с учетом экспериментально выявленных закономерностей изменения температурного режима и геометрических параметров мерзлого грунтового ядра, формирующегося вокруг сваи.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- использованием традиционных подходов, основанных на фундаментальных положениях классической механики грунтов;
- осуществлением комплекса экспериментальных работ, включающих как лабораторные, так и полевые эксперименты, с применением сертифицированных и поверенных измерительных средств и аппаратуры;
- применением лицензированных программ, базирующихся на дискретизации расчетной области методом конечных разностей либо конечных элементов;
- сопоставлением полученных данных с результатами исследований других авторов.

Апробация работы: основные положения диссертационного исследования доложены и обсуждены на национальных, всероссийских, международных научных мероприятиях, которые проходили с 2020 по 2025 год в разных городах России. Общее число выступлений по теме исследования – 9.

Публикации. По теме исследования опубликовано 6 статей, включая 3 публикации в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация включает в себя введение, четыре главы, общие выводы, список литературы и два приложения. Общий объем работы – 142 страницы машинописного текста, содержащих 87 рисунков и 13 таблиц.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Научные результаты подтверждают соответствие диссертации пунктам 5, 11, 15 паспорта специальности 2.1.2 Основания и фундаменты, подземные сооружения.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Многолетнемерзлые грунты в качестве оснований объектов промышленного и гражданского назначения

Более чем на 64 % территории Российской Федерации залегают вечномерзлые грунты (далее – ВМГ), границы распространения которых представлены на рисунке 1.1. На территориях залегания ВМГ находится огромный ресурс полезных ископаемых (запасы нефти, газа и другие) [48]. Вечная мерзлота присутствует и в других странах: США, Канаде, Исландии, Гренландии, Чили (в горной местности), Монголии и Килиманджаро и других.

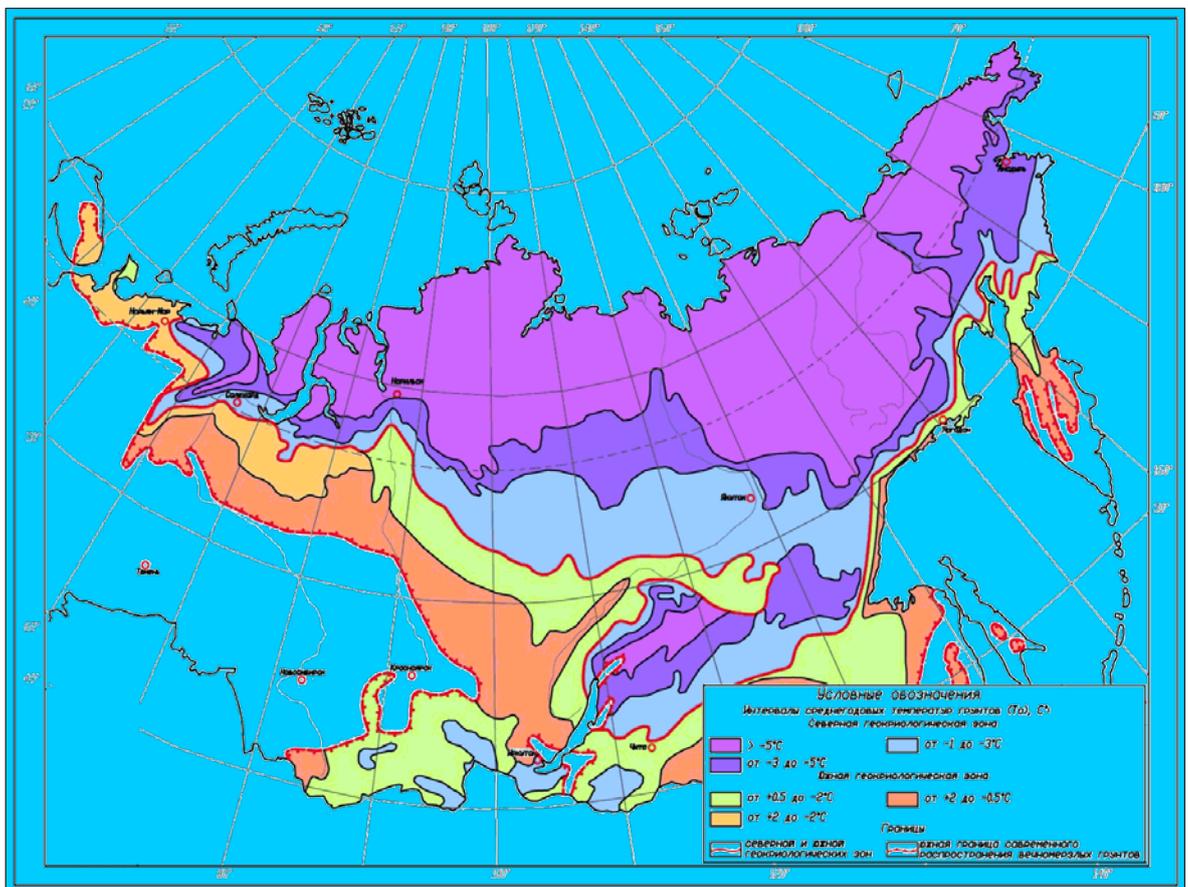


Рисунок 1.1. Распространение вечномерзлых грунтов на территории России (фотография из открытых источников)

Как правило, ВМГ расположены в зонах со среднегодовой температурой воздуха ниже 0°C (рис. 1.2). Среднюю температуру ВМГ определяют измерениями на глубине, наименее подверженной сезонным колебаниям, 10 м.

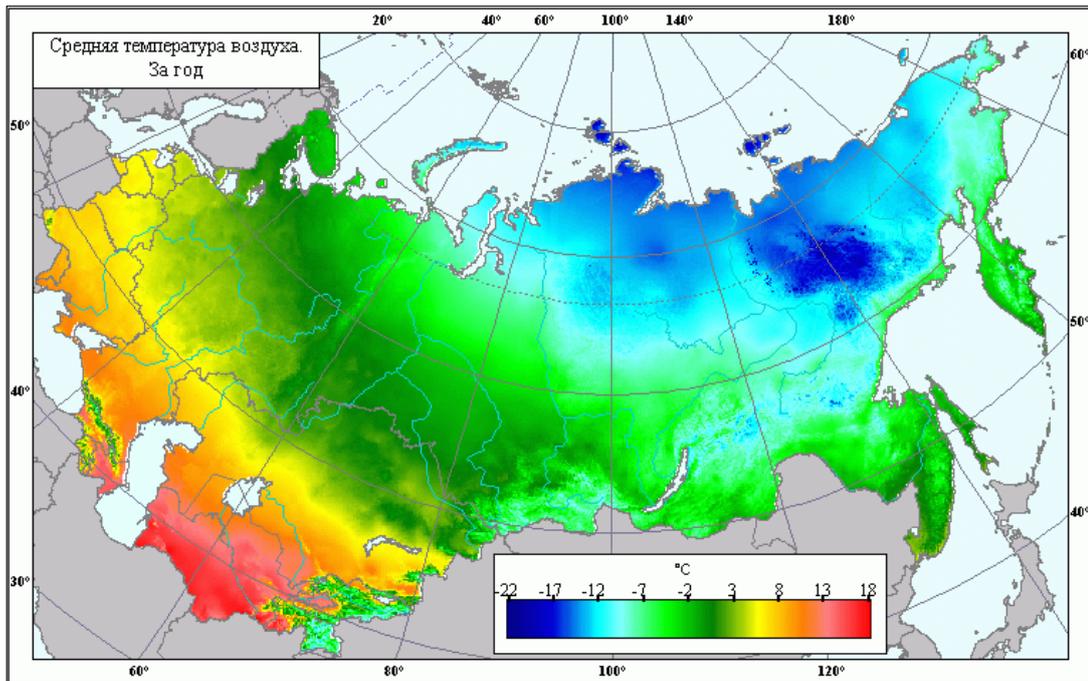


Рисунок 1.2. Средняя температура воздуха на территории России (фотография из открытых источников)

Мощность мерзлых грунтов на территории РФ, представленная на рисунке 1.3, определяется многими факторами (территориальным расположением, свойствами грунтов, наличием или отсутствием почвенно-растительного слоя и другими) и варьируется от нескольких до нескольких сотен метров.



Рисунок 1.3. Мощность ММГ на территории РФ (фотография из открытых источников)

Особенностью возведения фундаментов в криолитозоне является использование ВМГ в качестве оснований зданий и сооружений. По распространению ВМГ бывают: сплошного, преимущественно сплошного, массивно-островного, островного и редкоостровного распространения. Прочность вечномерзлых грунтов как оснований определяется температурой [45, 55, 121], криогенным строением, льдистостью, дисперсностью и засоленностью. Грунты в криолитозоне могут быть мерзлыми, морозными, переохлажденными, оттаявшими, оттаивающими и тальми [61]. Согласно научно-технической литературе [125], вечномерзлые грунты могут быть сыпучими, твердомерзлыми и пластичномерзлыми. Твердомерзлые грунты характеризуются низкой сжимаемостью под нагрузкой, так как сцементированы льдом (коэффициент сжимаемости в среднем $0,05 \text{ см}^2/\text{кг}$) [21]. Пластичномерзлым грунтам присущи как сцементированность льдом, так и наличие вязких свойств, обусловленных содержанием большого количества незамерзшей воды (коэффициент сжимаемости $10^2\text{--}10^3 \text{ см}^2/\text{кг}$) [22]. Сыпучемерзлым грунтам присущи несцементированность льдом и независимость сжимаемости от величины температуры [20].

1.2. История исследования мерзлых грунтов

В конце XVII в. в бассейне реки Енисей и на полуострове Таймыр появились первые упоминания о вечномерзлых грунтах, связанные с находками останков доисторических животных. Также в 1640 г. русские воеводы Головин и Глебов писали сообщения в Москву о том, что в некоторых местах земля в течение лета не оттаивает [138]. Далее упоминалось о наличии мерзлоты на территории Якутии и Забайкалья. Казак Ярослав Святогоров впервые обнаружил мерзлую структуру грунта, которую впоследствии изучили экспедиции под руководством Семена Дежнева и Ивана Реброва. В отчетах работы экспедиции указано, что существуют особые зоны, где земля оттаивает в середине лета на величину два и менее аршина. Похожие наблюдения представлены и в трудах М.В. Ломоносова [97]. В начале XIX в. активно началось изучение мерзлых грунтов, расположенных на северной территории Сибири и западной части

страны. Миддендорф А.Ф. впервые измерил температуру мерзлых грунтов вблизи города Туруханск, в районе бассейна Лены, в недрах шахты Шергинск в конце XIX в., а затем и на территории Якутска. Г.И. Вильдом очертил южную границу мерзлоты, а А.И. Воейков установил влияние снега на распространение мерзлых грунтов. Согласно исследованиям М.И. Сумгина, Б.Н. Демчинского, С.П. Качурина, Н.И. Толстихина, В.Ф. Тумеля [135, 136, 137], первая четверть XX в. известна строительством железных дорог в Забайкальском крае и на Амуре, что требовало изучения свойств залегающих мерзлых грунтов. В этот же период проведены исследования по расположению мерзлых грунтов на территории Иркутска, в районе Енисейска, Забайкальском крае и Амуре. Чуть позже Богданов Н.С., Пассек В.В. выпустили труды, посвященные влиянию ВМГ на здания и сооружения. В начале XX в. Сумгин М.И. впервые употребил понятие «вечная мерзлота», а в конце 1940 г. выпустил научный труд под названием «Общее мерзлотоведение». В середине 1930 г. впервые созвана научная группа для изучения мерзлых грунтов (в дальнейшем переименованная в комитет изучения вечной мерзлоты), на базе которой в конце 1939 г. образован институт мерзлотоведения АН СССР имени В.А. Обручева. По данным исследований [105], во второй четверти XX в. были выпущены первые работы о мерзлых грунтах, опубликованы систематизированные труды технического характера, а чуть позже появилось самостоятельное научное направление – мерзлотоведение. Первая «Геокриологическая карта Советского Союза» была разработана в середине 1997 г. Третья четверть XX в., по данным исследований [94, 129, 131], известна стремительным развитием мерзлотоведения как отдельной научной отрасли, впоследствии разделенной на отдельные направления. В XX–XXI вв. исследования физических, химических и механических свойств мерзлых и оттаивающих грунтов активно продолжаются [75, 78, 79]. Многочисленные труды Мельникова В.П., Хрусталева Л.Н., Горелика Я.Б., Вакулина А.А., Колунина В.С., Долгих Г.М., Окунева С.Н., Дубины М.М., Мусакаева Н.Г., Феклистова В.Н., Макарова В.И., Поденко Л.С. и многих других ученых посвящены исследованиям многолетнемерзлых грунтов

и прогнозу динамики их состояния [27, 44, 65, 73, 74, 76, 100–103, 106–109, 112, 113, 116, 144–148].

1.3. Способы возведения промышленных и гражданских объектов на вечномёрзлых грунтах

Цытович Н.А., Сумгин М.И., Салтыков Н.И. в начале 1930-х г. предложили использовать в качестве фундаментов отдельно стоящие стойки (колонны типа «башмак», забуренные в мерзлое основание) с вентилируемым подпольем для поддержания требуемого температурного режима грунтов основания. В конце 1948 г. произошло первое внедрение железобетонных свай, которые с 1950-х г. массово применяли в Якутии и других регионах.

Согласно научно-технической документации [126], по способам погружения в многолетнемерзлый грунт сваи подразделяются на буроопускные, опускные, бурозабивные (забивные), бурообсадные (буронабивные) и винтовые.

На основе пятидесятилетнего опыта массового возведения объектов на территории Якутии Цытович Н.А. [149] предложил два основных принципа строительства фундаментов на вечномёрзлых грунтах: обеспечение сохранения мерзлого состояния грунта основания либо контролируемое оттаивание (предпостроечное либо в процессе строительства и эксплуатации) с упрочнением и прогнозом осадок грунтов основания. В рамках исследования, представленного в работе [91], анализируется возможность применения «мерзлых насосов» в качестве конструктивных элементов оснований объектов промышленного и гражданского назначения. Данный метод имеет ряд преимуществ перед предпостроечным оттаиванием и был широко применен в Якутии [108], Норильске [114], Воркуте, на БАМе, севере Тюменской области и в других северных районах.

До 1951 г. в криолитозоне использовали такие же конструкции фундаментов, что и на талых грунтах. Однако суровые климатические условия требовали повышенной прочности, морозостойкости и водонепроницаемости данных фундаментов [62]. Согласно исследованиям Г.О. Лукина [98], с XVIII и до середины XX в. в Якутии преобладали бутовые фундаменты, а также

деревянные. Конструкции деревянных фундаментов широко применены в Игарке [43], Норильске [90], Воркуте [40], Якутске [99] и других северных городах. При строительстве на территориях распространения ВМГ универсальным способом строительства является сохранение основания в мерзлом состоянии в период возведения и эксплуатации, т.е. используют I принцип строительства. Свайное фундаментостроение является наиболее распространенным видом фундаментов в условиях криолитозоны.

Вопросам теплового взаимодействия инженерного сооружения с вечномерзлыми грунтами посвящены работы Коновалова А.А., Павлова А.В., Порхаева В.Г., Горелика Я.Б., Цытовича Н.А. и многих других авторов.

Возведение сооружений в криолитозоне в настоящее время осуществляется на основе следующих принципов [126]:

- первый принцип проектирования: при использовании ВМГ в качестве основания их мерзлое состояние должно сохраняться на протяжении всего периода строительства и дальнейшей эксплуатации объекта;
- второй принцип проектирования: многолетнемерзлые грунты основания используют либо уже оттаявшими до определенной глубины перед началом строительства, либо с возможностью их естественного оттаивания в процессе дальнейшей эксплуатации объекта.

Возможно применение следующих основных способов строительства на территориях распространения ВМГ:

Замещение в основании слабых грунтов на песчаные и гравийно-песчаные грунты непросадочные и непучинистые, укладываемые с требуемым коэффициентом уплотнения

Данный способ довольно дорогостоящий и применяется крайне редко.

Возведение охлаждающей подсыпки по поверхности мерзлого грунтового основания

Способом регулирования и поддержания температурного режима большого по площади вечномёрзлого грунтового основания является устройство охлаждающей подсыпки по дневной поверхности. Данный способ эффективен, например, при наличии мощных массивов подземного льда. Рекомендуется комбинирование, то есть устройство подсыпок в сочетании с другими мероприятиями (устройство проветриваемого (вентилируемого) подполья, термоизоляции, воздушных и искусственных систем охлаждения).

Возведение подсыпок на площадках с ископаемым льдом предпочтительно при возможности термокарстовых явлений, оврагообразования и т.д. Подсыпки могут выполняться как для отдельно стоящих, так и для группы зданий. При вертикальной планировке возможна сплошная отсыпка всей территории либо островная, при которой насыпи устраиваются только под зданиями и сооружениями, включая дороги и подъездные пути. Сплошная насыпь территории дает возможность устройства более эффективной и простой системы водоотвода со значительным улучшением степени благоустройства территории и условий проживания жителей.

Конструктивно подсыпка состоит из четырех основных элементов: тела песчаной насыпи, системы охлаждающих труб, теплоизоляции и защитного слоя. Назначение толщины песчаной насыпи и теплоизолятора осуществляется исходя из условия недопущения выхода подошвы сезонного оттаивания грунтов за пределы насыпи.

Высота подсыпки и заложение откосов вычисляются по номограмме М.Д. Головки. При этом подсыпка рассматривается как термоизоляция, и ее высота подбирается так, чтобы глубина протаивания под ней, определенная по номограмме, была не более естественной мощности сезоннооттаивающего слоя: при окончательном назначении мощности насыпи к величине высоты, определенной по теплотехническому расчету, следует прибавлять вычисленное значение осадки сезоннооттаивающего слоя под нагрузкой.

Первым зданием, построенным на подсыпке из среднезернистого песка мощностью 215 см, является сооружение технического состава в поселке Амдерма.

Оценку эффективности применения теплоизоляции ММГ рассматривали в своих исследованиях Стетюха В.А. и Рахвалова Н.В. Авторы определили глубину оттаивания ВМГ при различном размещении теплоизолирующего материала толщиной 20 см в массиве грунта. Они рассмотрели варианты расположения утеплителя на глубине 0,2; 0,6; 1 и 1,4 м от дневной поверхности. В качестве утеплителя использовали экструзионный пенополистирол «Пеноплэкс 35». По результатам экспериментов установлено, что наибольший эффект по защите ВМГ от оттаивания достигается при укладке теплоизоляции вблизи от дневной поверхности. Размещение утеплителя на глубине 0,2 м от поверхности является наиболее эффективным техническим решением, позволяющим уменьшить глубину оттаивания на величину в среднем равную 1 м.

Закрепление грунтов инъекционными методами:

- Смолизация

Метод заключается в нагнетании в оттаявшее грунтовое основание различных синтетических смол: акриловой, виниловой, эпоксидной, полиэфирной, фенольной [41, 51, 82] и других. Через 10–12 дней после завершения инъекционных работ грунты основания набирают требуемую прочность. Основным недостатком смолизации является токсичность смол [36] и высокая стоимость. Научные труды Б.А. Ржаницына, В.В. Аскалонова, Л.Н. Барановой, Н.Ш. Белевитиной, А.К. Бугрова, С.С. Морозова, Л.В. Гончаровой, Н.А. Качинского, М.Т. Кострико, К.А. Лебедева, М.Н. Першина, Е.А. Старчевской, J. Arnold, R. Boyle, O. Caldonazzi, M. Dean, M. Johnson, D.Kubicek и многих других посвящены изучению укрепления грунтов путем смолизации [29, 37, 42, 52, 83, 95, 122, 130, 142].

- **Силикатизация**

В данном методе используется смесь на основе жидкого стекла (силикат натрия (Na_2SiO_3)), заполняющая грунтовые поры, образуя гелеобразное состояние, и укрепляющая грунт. Однако упрочнение данным методом требует высокого расхода материала и, соответственно, является дорогостоящим. Основное преимущество – укрепляемые оттаявшие грунты получают высокую прочность и водонепроницаемость. В фундаментостроении применяется однорастворная и двурстворная силикатизация. Фундаменты комплекса 9-этажных домов близ озера Сайсара в Якутске были успешно закреплены раствором жидкого стекла на основе силиката натрия. Изучению укрепления грунтов силикатизацией посвящены труды В.П. Ананьева, С.Д. Воронкевича, Н.В. Дмитриева, И. Езерского, Г.Н. Жинкина, Г. Иостена, В.Ф. Калганова, Н.А. Ларионовой, В.Е. Соколовича, М. Стаматиу, Е.С. Чаликовой, Л.П. Шуваловой, I. Katayama, M. Mochizuki и многих других [18, 72, 81, 96, 111, 120, 123].

Инъектирование цементными растворами

Данный способ заключается во введении в грунтовое основание различных цементных составов под различным давлением нагнетания.

В зависимости от состава раствора и особенностей производства работ существуют следующие виды инъектирования:

- микроцементация;
- цементация;
- геокомпозитная инъекционная технология;
- закрепление грунтов методом струйного инъектирования;
- пропиточная инъекция;
- инъекция с применением высокого давления;
- технология инъекции через манжеты.

Все перечисленные инъекционные методы применимы в оттаявших и оттаивающих многолетнемерзлых грунтах.

Устройство вентилируемого (проветриваемого) подполья

Основным способом возведения зданий и сооружений на территориях распространения вечномёрзлых грунтов по I принципу до конца XX в. было использование только вентилируемого подполья либо возведение неотапливаемых первых этажей, выполняющих роль подполья.

Проветриваемое подполье – это область между низом перекрытия первого этажа и поверхностью грунтового основания. Основная роль подполья состоит в обеспечении требуемого температурного режима грунтового основания. Температурный режим определяется температурой наружного воздуха, скоростью и направлением движения ветровых потоков.

Цытович Н.А. в 1928 г. расчетным методом подтвердил эффективность строительства вентилируемого подполья. Одним из первых зданий, построенных с устройством вентилируемого подполья, было сооружение Нарынской станции метеорологии, построенное в начале 1930 г. на Алтае.

Существуют следующие основные виды подполий:

- непроветриваемые;
- открытые;
- с регулируемым проветриванием.

Непроветриваемые подполья возводят под зданиями в районах Крайнего Севера с низкими отрицательными температурами. Эффективность подполья увеличивается при небольших габаритных размерах здания в плане. Грунтовое основание сохраняется мерзлым за счет притока холода от близлежащих боковых массивов мерзлого грунта, свободных от застройки.

Подполья открытого типа постоянно сообщаются с окружающей средой в отличие от подполий с регулируемым проветриванием, в которых возможно закрывать продухи в летний период. Основным преимуществом открытого подполья является возможность обеспечения более низкого температурного режима.

Для избежания образования застоя воздуха в нижней части подполья и устройства стока воды планируют и располагают поверхность грунта в подполье

выше уровня грунта вокруг здания. Для беспрепятственного движения воздушных масс в пространстве подполья нормируется его минимальная высота.

Площадь продухов и режим вентилирования подполий назначают по результатам теплотехнических расчетов, основная задача которых – обеспечение и поддержание требуемого температурного режима грунтового основания при строительстве и эксплуатации здания. На стадии проектирования подполий необходимо проводить расчет модуля вентилирования.

Однако практический опыт возведения зданий и сооружений на ВМГ выявил существенные недостатки подполий. К основным можно отнести следующие:

- как правило, возможно только поддержание требуемого температурного режима грунтового основания, при этом провести дополнительное промораживание не всегда возможно;
- потери тепла через перекрытие цокольного этажа довольно значительны [93, 107] и влияют на внутренний микроклимат помещений;
- при высоте подполья до 1 м происходит занос снегом, который в зимнее время оказывает отепляющее влияние, а в весеннее время при таянии переувлажняет грунт;
- недостаточная ремонтпригодность и управляемость проветриваемого подполья делают его уязвимым при непредвиденных тепловых воздействиях и аварийных ситуациях.

Укладка охлаждающих труб и каналов

Период опытно-промышленного применения искусственного охлаждения грунтов основания начался после изобретения С.И. Гапеевым в 1960-х г. однофазных термостабилизаторов. Они стали применяться для замораживания и температурной стабилизации грунтов оснований зданий с проветриваемыми подпольями и на других сооружениях. Использование термосифонов было впервые предложено в СССР в 1945 г. Б.М. Блиером и М.М. Цинманом [38]. Дальнейшие разработки в СССР принадлежат С.И. Гапееву (1957 г.) [58] и

В.И. Макарову [101]. В США аналогичные предложения поступили от Э. Лонга в 1964 г. [10, 109] и Д.К. Блэча в 1965 г. [1].

Для сохранения мерзлого состояния грунтов основания при строительстве зданий и сооружений также укладывали охлаждающие трубы на некоторой глубине и объединяли общими коллекторами, по которым подавалась охлаждающая жидкость или газ (в летний период систему закрывали при использовании воздуха вместо жидкости или газа).

Охлаждение, замораживание осуществлялись естественным (с помощью воздушных колонок и термосифонов) в зимний период и искусственным (с помощью холодильных машин) холодом всесезонно [103].

Охлаждение, замораживание производилось и через буровые скважины, в которые погружались замораживающие колонки. Пространство между стенкой скважины и колонкой заполнялось сухим песком, иногда местным грунтом. Глубина скважины принималась на 1 м больше глубины охлаждения (замораживания).

В процессе охлаждения, замораживания проводился контроль за температурным режимом грунтов путем измерения температуры в термометрических скважинах.

Воздушное охлаждение, замораживание в общем случае велось через замораживающую колонку, погружаемую в скважину. Колонка состояла из двух коаксиальных труб. Во внешнюю трубу за счет разрежения, создаваемого вентилятором, поступал холодный зимний воздух. В последние годы при охлаждении пластичномерзлого грунта часто вместо внешней трубы колонки использовали саму буровую скважину.

Охлаждение грунтов основания возможно и при использовании термосифонов [2, 4, 5, 7–9, 11, 12, 14, 15, 17, 19, 24, 25, 30, 32, 39, 47, 48, 71, 77, 84, 85, 88, 92, 104, 119, 127, 134, 139, 140, 141, 150, 153]. Термосифоны являются закрытой охлаждающей системой, поэтому ее работоспособность не зависит от формирования конденсата на внутренней поверхности трубы. Термосифон работает за счет низких температур атмосферного воздуха в зимнее время и не

требует энергетических затрат в процессе эксплуатации. В простейшем варианте термосифоны представляют собой герметичную трубу, заполненную хладагентом и погруженную в скважину нижней частью. Различают жидкостные (хладагент – керосин, фреон 30) и парожидкостные (хладагент – аммиак, фреон 12, фреон 22, пропан-бутан) термосифоны.

Конвективное движение хладоносителя в зимний период обеспечивает теплоотвод от стенок жидкостного термосифона. Данный процесс обусловлен градиентом температуры и, соответственно, плотности хладоносителя между верхним и нижним участками трубы.

Существенный вклад в исследование тепловых процессов в системе «мерзлое основание – СОУ – окружающий воздух» внесли Горелик Я.Б., Аникин Г.В., Поденко Л.С., Феклистов В.Н., Вялов С.С., Александров Ю.А., Миренбург Ю.С., Федосеев Ю.Г., Long E.L., Пиоро И.Л., Антоненко В.А., Пиоро Л.С. и другие.

В настоящее время унифицированы способы охлаждения и поддержания требуемой температуры ВМГ. Эффективным способом является использование саморегулирующихся охлаждающих установок, а также ряда модификаций, из которых активно применяются 4 вида СОУ [74]:

- Индивидуальный термостабилизатор

Предназначен для замораживания талых грунтов или охлаждения пластичномерзлых грунтов, являющихся основанием зданий и сооружений, вне зависимости от типа подполья. Работа термостабилизатора [102] основана на переносе холода окружающей среды в грунт основания для достижения требуемых расчетных температур.

Термостабилизатор работает на основе естественных перепадов температур между грунтом и воздухом, а также за счет действия силы тяжести. Его функционирование не требует затрат электроэнергии. Термостабилизатор производят в виде герметичной сварной трубчатой конструкции, заполненной хладагентом, как правило, аммиаком.

Современные термостабилизаторы работают по парожидкостному принципу действия. Длина устройства варьируется от 7 до 24 м, при этом подземная часть может достигать 21 м. В грунтовое основание монтаж термостабилизатора осуществляют вертикально, наклонно либо слабонаклонно (рис. 1.4).

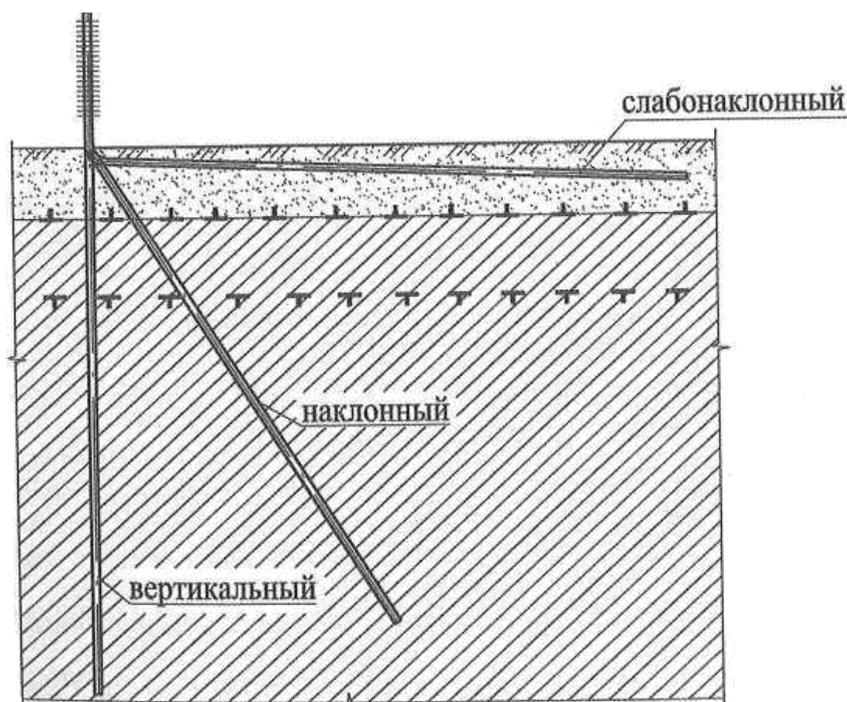


Рисунок 1.4. Индивидуальный термостабилизатор (фотография из открытых источников)

- Система термостабилизации ГЕТ (горизонтальная трубчатая система с естественной циркуляцией)

Система ГЕТ, изображенная на рисунке 1.5, предназначена для поддержания и понижения температуры мерзлых грунтов основания [64]. Конструктивно система состоит из горизонтальных труб и конденсатора. Главное достоинство данной системы – возможность охладить и поддерживать требуемую расчетную температуру грунтов в труднодоступных местах, таких как основания зданий с полами по грунту и нефтяные резервуары на песчаных подсыпках.

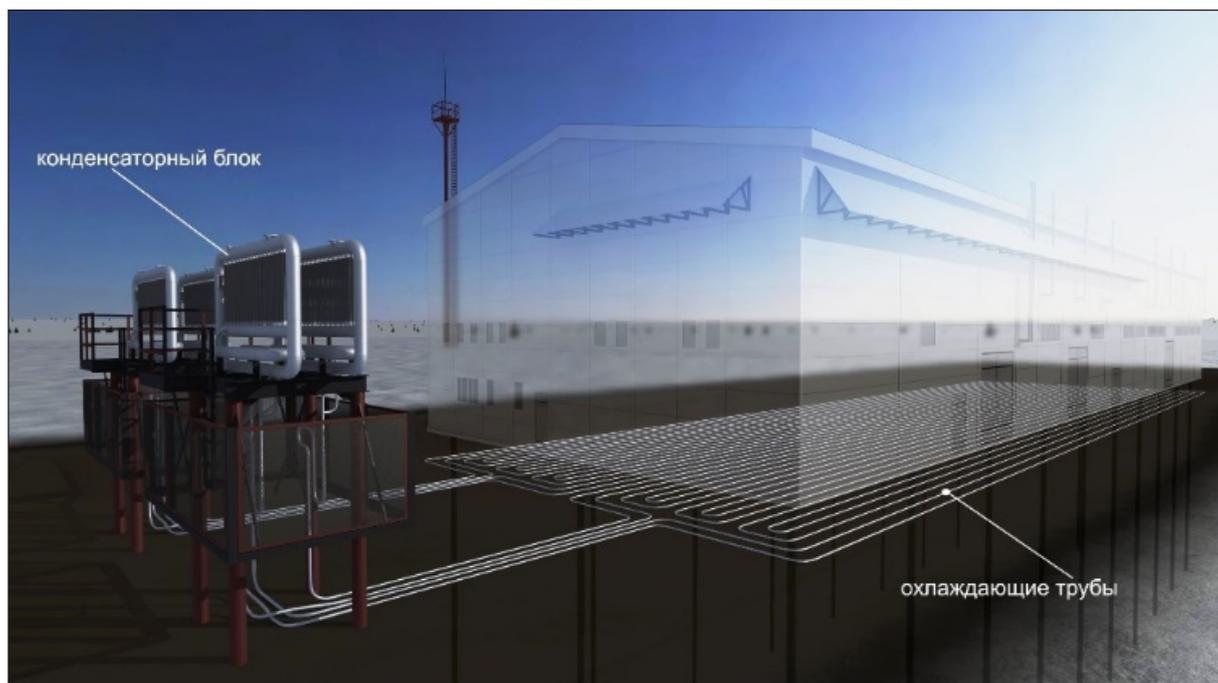


Рисунок 1.5. Естественно действующая трубчатая система ГЕТ (фотография из открытых источников)

Система состоит из двух основных частей:

- испарительного контура: представляет собой сеть труб, погруженных в грунт основания. По этим трубам происходит циркуляция хладагента, который, испаряясь, обеспечивает замораживание грунта;
- конденсаторного блока: установка блока возможна на расстоянии до 70 м от объекта. В блоке происходит процесс конденсации паров хладагента, обусловленный естественной циркуляцией воздуха и силой тяжести. Сконденсированный хладагент затем направляется обратно по системе.

Система ГЕТ действует за счет переноса тепла грунта к хладагенту. Хладагент переходит из жидкой фазы в парообразную. Пар перемещается в сторону конденсаторного блока, где конденсируется в жидкую фазу, передавая тепло в атмосферу через ребрение. Охлажденный и сконденсированный хладагент вновь стекает в испарительную систему и повторяет цикл движения.

В конструкции данных систем используются резервные трубы, которые возможно подключать к автономной передвижной холодильной машине и осуществлять принудительное охлаждение грунта.

- Термостабилизирующая система ВЕТ

Вертикальная естественнодействующая трубчатая система (ВЕТ), изображенная на рисунке 1.6, предназначена для замораживания и поддержания заданного температурного режима вечномерзлых грунтов и устранения непредвиденных тепловыделений под фундаментами различных сооружений (резервуаров объемом до 50000 м³, устьев газовых и нефтяных скважин, полигонов ТБО, парков химических реагентов и т.д.); зданий (газокомпрессорных и нефтеперекачивающих станций, промышленных зданий, жилых комплексов, зданий общественно-гражданского назначения); автомобильных и железных дорог. Система состоит из вертикально расположенных труб и конденсаторного блока, который располагается на поверхности грунта.

Главное принципиальное отличие системы ВЕТ от системы ГЕТ – это размещение в необходимых расчетных точках вертикальных охлаждающих труб (ТОВ), объединенных соединительными каналами с конденсаторным блоком.

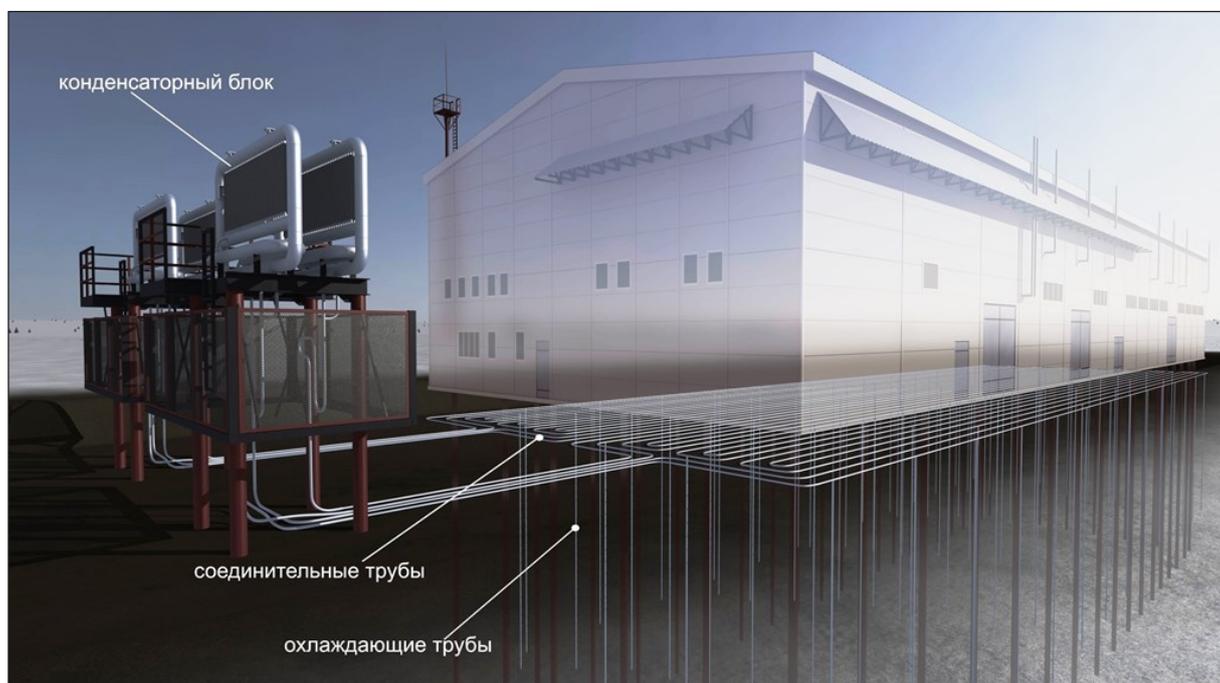


Рисунок 1.6. Естественно действующая трубчатая система ВЕТ (фотография из открытых источников)

Основное преимущество данной системы термостабилизации – возможность замораживать грунт в труднодоступных местах или там, где размещение надземных конструкций затруднительно или технологически

невозможно. Система состоит из вертикальных охлаждающих труб, циркулирующих хладагент, и конденсаторного блока, где происходит естественная конденсация хладагента.

Принцип функционирования системы основан на использовании тепловой энергии грунта. Специальные охлаждающие трубы, расположенные в грунтовом основании, поглощают тепло. Это тепло передается циркулирующему в трубах хладагенту, который при этом испаряется, превращаясь из жидкости в пар. Далее этот пар перемещается к конденсаторному блоку. В конденсаторе пар отдает накопленное тепло в атмосферу через специальные ребрения. В результате охлаждения пар снова становится жидкостью. Охлажденный хладагент затем возвращается в испарительную систему, чтобы начать новый цикл работы. Системы оснащены резервными трубами для подключения мобильной холодильной станции и принудительного охлаждения грунта.

- Глубинные саморегулирующиеся охлаждающие установки (СОУ)

Для обеспечения надежности эксплуатации таких объектов, как плотины и устья скважин, на глубине до 100 м применяют глубинные саморегулирующиеся охлаждающие установки. Эти установки выполнены в виде герметичной неразборной сварной конструкции, заправленной хладагентом. Подземная часть имеет длину более 13 м.

Анализ принципов и особенностей работы саморегулирующихся охлаждающих установок позволил выделить их основные достоинства и недостатки.

К достоинствам СОУ можно отнести:

- возможность автономной работы за счет действия силы тяжести;
- малую материалоемкость металла и хладагента вследствие малых размеров;
- возможность всесезонной работы при подключении к холодильным станциям.

Недостатки СОУ заключаются в следующем:

- запускаются в работу не сразу (как, например, охлаждающие каналы), а только при перепаде температур воздуха и грунта равном, как правило, 8–10 °С, поэтому малоэффективны, если надо срочно устранить оттаивание в локальных зонах;
- ввиду малых размеров имеют малую жесткость, в связи с чем плохо сопротивляются изгибу при действии, например, сил морозного пучения;
- плохая ремонтпригодность: при выходе из строя одной трубки надо делать трубки – дублиеры;
- низкая эффективность работы (в некоторых случаях СОУ не включаются в работу) при малой скорости ветра;
- в слабонаклонных СОУ конденсирующийся хладагент течет ручейком в нижнем сечении трубки. В связи с этой неравномерностью осложнен расчет теплосъема.

1.4. Основные причины разрушения промышленных и гражданских объектов, построенных на вечномёрзлых грунтах

До середины XX в. практически все объекты, построенные на ВМГ, испытывали критические деформации и становились аварийными в первые годы эксплуатации, о чем свидетельствуют многочисленные данные натуральных наблюдений. Результаты мониторинга состояния объектов, возведенных в криолитозоне, отражающие наличие сверхнормативных деформаций и трещин, представлены в трудах Вялова С.С., Железняк И.И., Кроника Я.А., Лязгина А.Л., Макарова В.И., Минкина М.А. [110], Ремизова В.В., Ильичева В.А. и других. Около 80 % зданий по данным технических отчетов имели недопустимые деформации, представленные на рисунке 1.7. Причиной данного явления являлось повышение температуры грунтов и, как следствие, снижение прочностных и деформационных характеристик основания.



Рисунок 1.7. Деформации зданий, возведенных на вечномёрзлых грунтах (фотографии из открытых источников)

Как было установлено позже, основным фактором, определяющим прочность и несущую способность мерзлых грунтов в качестве оснований зданий и сооружений, является величина отрицательной температуры.

Н.А. Цытович классифицировал внутренние связи в вечномёрзлых грунтах на три основных вида, влияющих на их прочность:

- твердые минеральные частицы грунта соединены друг с другом на молекулярном уровне. Интенсивность этих связей непостоянна и определяется такими факторами, как площадь контакта, расстояние между частицами, плотность грунта и их минеральный состав;
- прочностные и деформационные свойства материала в значительной степени обусловлены льдоцементными связями;
- характер и условия образования, формирования и дальнейшего существования определяют структурно-текстурные связи.

Наличие льдоцементных связей придает мерзлым грунтам реологические свойства, определяющие их поведение во времени. Под постоянным давлением мерзлые грунты медленно деформируются (ползучесть), их внутренние

напряжения ослабевают с течением времени (релаксация), а при продолжительном воздействии нагрузок их прочность снижается [50].

Установлено, что длительное приложение нагрузки, даже при ее постоянной величине [53], может привести к снижению прочности грунта в 5–15 раз. Данное явление развивается с течением времени и характерно для связных грунтов. В зависимости от продолжительности воздействия нагрузки выделяют мгновенную прочность (при очень коротком времени нагружения) и предельно-длительную (при очень долгом времени нагружения).

С.С. Вялов выделил следующие виды ползучести, основываясь на характере развития деформаций [54]:

- затухающая: деформации стабилизируются;
- вековая: скорость деформации уменьшается, но сама деформация продолжает возрастать;
- условно-установившаяся: характеризуется течением, подобным пластично-вязкому;
- прогрессирующая: деформации продолжают возрастать до критического значения.

Изучением процессов промерзания-оттаивания вечномерзлых грунтов оснований промышленных и гражданских объектов занимались следующие ученые: Аксенов Б.Г., Артюшенко И.А., Блиер Б.М., Бучко Н.А., Велли Ю.Я., Гапеев С.И., Герасимов А.С., Гольдштейн М.Н., Головкин М.Д., Горелик Я.Б., Гурьянов И.Е., Даниэлян Ю.С., Долгих Г.М., Дубина М.М., Ершов Э.Д., Зарецкий Ю.К., Кислицын А.А., Комаров И.А., Коновалов А.А., Кроник Я.А., Кудрявцев С.А., Кутвицкая Н.Б., Макаров В.И., Мельников В.П., Минкин М.А., Окунев С.Н., Павлов А.В., Парамонов В.Н., Порхаев Г.В., Пронозин Я.А., Редозубова Д.В., Роман Л.Т., Сахаров И.И., Чжан Р.В., Федосеев Ю.Г., Феклистова В.Н., Фельдман Г.М., Хакимов Х.Р., Хрусталева Л.Н., Цытович Н.А., Шепитько Т.В., Шестернев Д.М., Ястребов А.Л., Taber S., Thompson S.F., Watson G.H. и другие.

За последние 25–30 лет возросло число аварий промышленных и гражданских объектов, возведенных на ВМГ. В ограниченно работоспособном и аварийном состояниях находятся более 50 % объектов в Якутске, более 70 % в Воркуте, более 60 % в Чите, более 50 % в Магадане, более 40 % в Норильске, более 70 % в Бурятии, более 35 % на Севере Тюменской области (фотографии деформированных объектов представлены на рис. 1.8, 1.9).



Рисунок 1.8. Обрушение секции жилого дома в поселке Черский, Якутия (фотография сделана В.Е. Романовским)



Рисунок 1.9. Разрушение части здания в поселке Амдерма, НАО (фотография из открытых источников)

Основными причинами нарушения работоспособности зданий и сооружений являются: неправильный выбор принципа проектирования (ошибки

на стадии инженерных изысканий и принятия конструктивных решений), низкое качество строительно-монтажных работ, ошибки в период эксплуатации и обслуживания, недоучет изменений природно-климатических условий площадки строительства. Так, происходящие глобальные климатические изменения оказывают существенное влияние на состояние многолетнемерзлых грунтов оснований. По данным исследований [124, 143, 152], криолитозона на протяжении своего развития характеризовалась циклическими изменениями климата, проявлявшимися в чередовании периодов похолодания и потепления, отличавшихся по своей длительности и интенсивности. В трудах Павлова А.В. [115, 117] представлены карты повышения среднегодовой температуры воздуха на севере России, по данным которых температура воздуха в криолитозоне к 2000 г. повысилась в среднем на 1 °С и более по сравнению с 1950 гг. Согласно исследованиям рабочей группы (WGCM) Всемирной программы исследования климата (WCRP), средняя скорость повышения температуры воздуха с 1976 по 2019 г. равна 0,166 °С/10 лет (рис. 1.10), с 1901 по 2019 г. равна 0,075 °С/10 лет [IPCC, 2019].

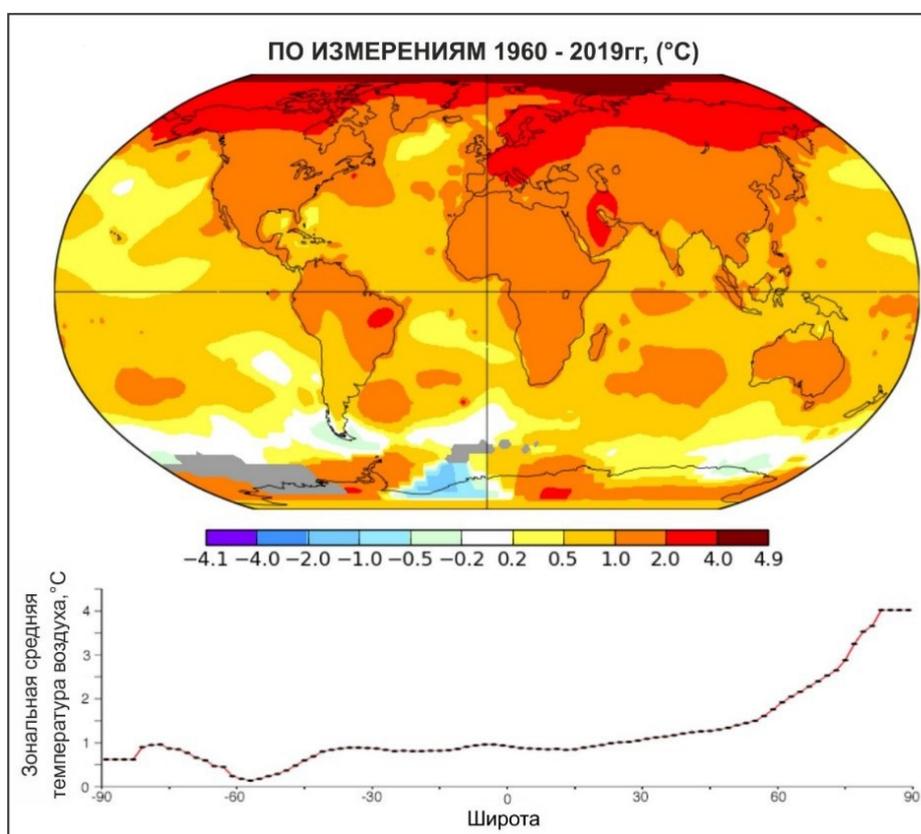


Рисунок 1.10. Изменения среднегодовой температуры воздуха (данные NASA)

В работах [56, 70, 86, 87, 151] рассмотрены прогнозные климатические изменения на севере России. Согласно исследованиям [28], повышение температуры воздуха на Севере происходит интенсивнее, чем в низких широтах. Увеличение приповерхностной температуры воздуха приводит к повышению мощности деятельного слоя и постепенному повышению температуры многолетнемерзлых грунтов в различных регионах [3, 13, 16]. Однако температура ВМГ зависит не только от температуры приповерхностного воздуха, но и от режима и количества осадков. Увеличение мощности снегового покрова производит утепляющий эффект на температурный режим мерзлых грунтов, хотя специалисты констатируют, что в Арктическом регионе наблюдается тенденция к сокращению продолжительности залегания снежного покрова – в среднем 2,03 дня за десятилетие. Изменение температуры воздуха и количества осадков в летний период оказывают влияние на характер теплообмена на поверхности. По данным многолетних климатических наблюдений на территориях РФ, тренд повышения среднегодовой температуры многолетнемерзлых грунтов ниже тренда потепления климата. Происходящие природно-климатические изменения влияют на термическую устойчивость многолетнемерзлых грунтов, которая определяется соотношением трендов температуры приповерхностного воздуха и температуры мерзлых грунтов (рис. 1.11).

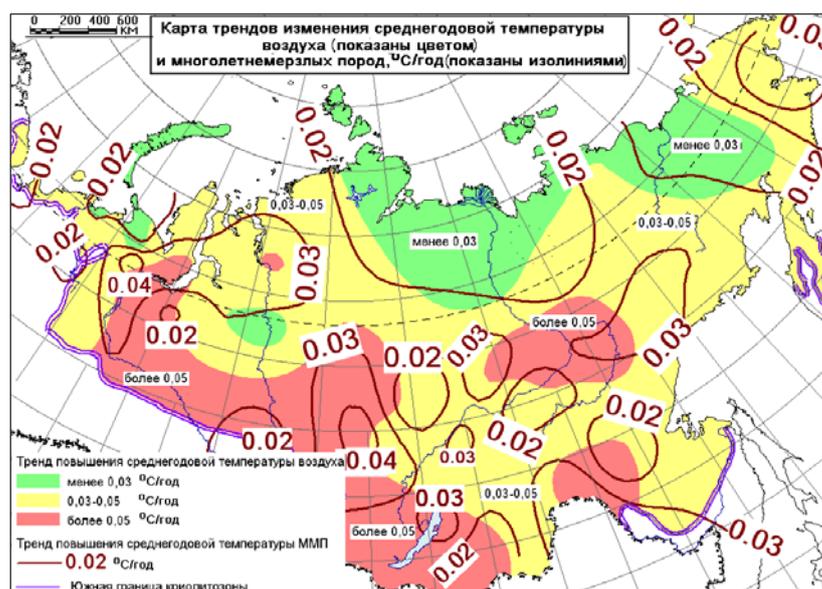


Рисунок 1.11. Линейные тренды температуры мерзлых толщ на территории криолитозоны России с 1975 по 2010 г. Авторы: Малкова, Павлов, 2012

Происходящие в XXI в. изменения природно-климатических условий способны привести к повышению температуры и частичной деградации многолетнемерзлых грунтов. Это может спровоцировать катастрофические геоэкологические последствия, вплоть до нарушения работоспособности линейно-протяженных объектов, инженерных сооружений, зданий и гидротехнических сооружений (рис. 1.12, 1.13).



Рисунок 1.12. Трубопровод, положение которого изменилось с подземного на надземное из-за деградации ВМГ в результате изменения климата (фотография сделана Г. Гривой)



Рисунок 1.13. Дegradация мерзлого основания резервуара топлиохранилища ТЭЦ-3 Норильско-Таймырской энергетической компании вследствие недоучета природно-климатических изменений (фотография из открытых источников)

Таким образом, понижение температуры ВМГ, осуществляемое путем применения различных технических решений, производится с целью увеличения их прочностных и механических характеристик. Согласно проведенному анализу научной и нормативной литературы, опыту строительства и эксплуатации зданий и сооружений на территории распространения мерзлых грунтов, безаварийная эксплуатация возможна только при одновременном учете как геокриологических условий площадки строительства, так и требований производства работ при строительстве и дальнейшей эксплуатации с учетом происходящих природно-климатических изменений.

1.5. Выводы по главе 1

1. В большинстве случаев при возведении объектов в криолитозоне для обеспечения требуемого температурного режима грунтового основания устраивали проветриваемое (вентилируемое) подполье, охлаждающие подсыпки по поверхности грунта, охлаждающие трубы (каналы) и другие конструктивно-технологические мероприятия. Однако проведенный анализ научно-технической литературы показал, что классические технические решения не всегда способствуют достижению требуемой расчетной температуры грунтового основания, а зачастую приводят к значительному увеличению продолжительности и стоимости строительства. В настоящее время в практике строительства промышленных и гражданских объектов активно используют комбинированное решение путем устройства вентиляруемого подполья с применением систем термостабилизации грунтов.
2. Широкое применение саморегулирующихся охлаждающих установок при строительстве в криолитозоне требует более качественной оценки работы охлаждающих устройств, более точных расчетов температурных полей грунтового основания с учетом происходящих природно-климатических изменений.
3. Задача обеспечения требуемого температурного режима оснований должна быть одновременно связана с прогнозной задачей напряженно-

деформированного состояния грунтов основания для безопасной эксплуатации зданий и сооружений. То есть необходимо проводить оценку деформаций в системе «промораживаемое основание – сооружение», детальную проработку возможности строительства надземных конструкций зданий и сооружений в период проведения термостабилизации грунтов основания, температуры которых не достигли требуемых проектных значений.

1.6. Обоснование выбранного направления работы

По результатам проведенного обзора научной литературы, технической и нормативной документации установлено, что при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов промышленного и гражданского назначения в криолитозоне наиболее распространенным способом является использование I принципа. Однако использование I принципа проектирования затруднено рядом причин:

1. Изменением природно-климатических условий. Наблюдается повышение приповерхностной температуры воздуха и температуры мерзлых грунтов, увеличение мощности деятельного слоя. Данные факторы негативным образом влияют на прочностные и механические характеристики мерзлых грунтов. В северных регионах Тюменской области тренд глобального потепления приповерхностной температуры воздуха в среднем равен $0.006 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{г}$. Согласно данным мониторинга и численного моделирования, происходит интенсивное изменение среднегодовой температуры воздуха в сравнении с аналогичными периодами прошлых лет [116, 118]. По данным исследований [106], реакция ММГ на изменение климата в настоящий момент достаточно активна, то есть величина сезонного протаивания и температура грунтов активно изменяются.
2. При проектировании объектов встречаются площадки строительства, инженерно-геологическое строение которых представлено как мерзлыми, так и оттаявшими грунтами, образованными вследствие природных условий (обводненности участка, особенностей рельефа участка,

заболоченности и т.д.) и техногенных воздействий (отепляющего воздействия зданий и сооружений, систематических сбросов и утечек из инженерных сетей, стока и застоя поверхностных дождевых вод и т.д.) с пониженным залеганием кровли мерзлоты. При проектировании фундаментов линейных объектов возможно пересечение различных участков с неоднородными инженерно-геокриологическими условиями (пересечение границы талых и мерзлых грунтов основания).

В сложившейся ситуации необходимо принять решение о выборе принципа проектирования. При использовании I принципа в заданных инженерно-геокриологических условиях не всегда возможно погрузить пята сваи и, соответственно, нижнюю часть испарителя СОУ в надежный слой мерзлого грунта. Таким образом, актуальной целью исследования является выявление закономерностей изменения температурного режима и его влияния на НДС оттаявшего многолетнемерзлого основания с погруженной в него свайей при термостабилизации вертикальными СОУ и действии вертикальных статических вдавливающих и выдергивающих нагрузок.

ГЛАВА 2. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОДЕЛИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ СВАИ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ

2.1. Цель и задачи лабораторных исследований

Постановка исследований в лабораторных условиях позволяет проводить серии экспериментов с сохранением исходных параметров и моделированием внешних факторов с минимальными отклонениями при наименьших временных и экономических затратах по сравнению с натурными исследованиями [23]. При проведении экспериментов в лабораторных условиях минимизируется влияние случайных факторов, что позволяет произвести качественную оценку полученных результатов.

Лабораторные эксперименты проведены для изучения характера и особенностей работы модели одиночной железобетонной сваи в процессе ее статического нагружения в термостабилизируемом основании, представленным талыми суглинками, в «открытой» системе (с подтоком воды). Использование в качестве грунта основания суглинка обусловлено тем, что продолжением лабораторных экспериментов будут натурные исследования на экспериментальной площадке, инженерно-геологическое строение которой представлено оттаявшими суглинками различной консистенции, расположенной на Карбоновом полигоне «Семь лиственниц» вблизи г. Лабытнанги (ЯНАО). Лабораторные эксперименты проведены с использованием метода расширенного подобия, при котором были выдержаны геометрические и временные аналогии с натурным объектом исследований. Эксперименты проводили с учетом оптимально подобранных к параметрам планируемого натурального эксперимента геометрического (M_G) и временного (M_B) масштабов, равных 1:10 и 1:100 соответственно.

В соответствии с поставленной целью исследования к основным задачам относятся:

1. Определение несущей способности сваи в талом основании, представленном суглинистыми грунтами.

2. Определение несущей способности сваи в термостабилизируемом основании, представленном суглинистыми грунтами, в конце первого – четвертого летних периодов.
3. Качественная оценка изменения несущей способности сваи путем сопоставления результатов статических испытаний талых и термостабилизируемых грунтов сваей статической вдавливающей нагрузкой.
4. Определение основных закономерностей изменения во времени температурного режима талого грунтового основания при термостабилизации одиночным вертикальным СОУ.
5. Определение основных геометрических размеров (диаметра, высоты) формируемого мерзлого грунтового ядра вокруг сваи в процессе термостабилизации талого грунтового основания одиночным вертикальным СОУ.

2.2. Экспериментальный стенд и контрольно-измерительное оборудование

Для достижения поставленных задач в научной лаборатории «Строительство на вечной мерзлоте» кафедры строительного производства и геотехники Тюменского индустриального университета был разработан и собран экспериментальный стенд [80], чертеж которого изображен на рисунке 2.1.

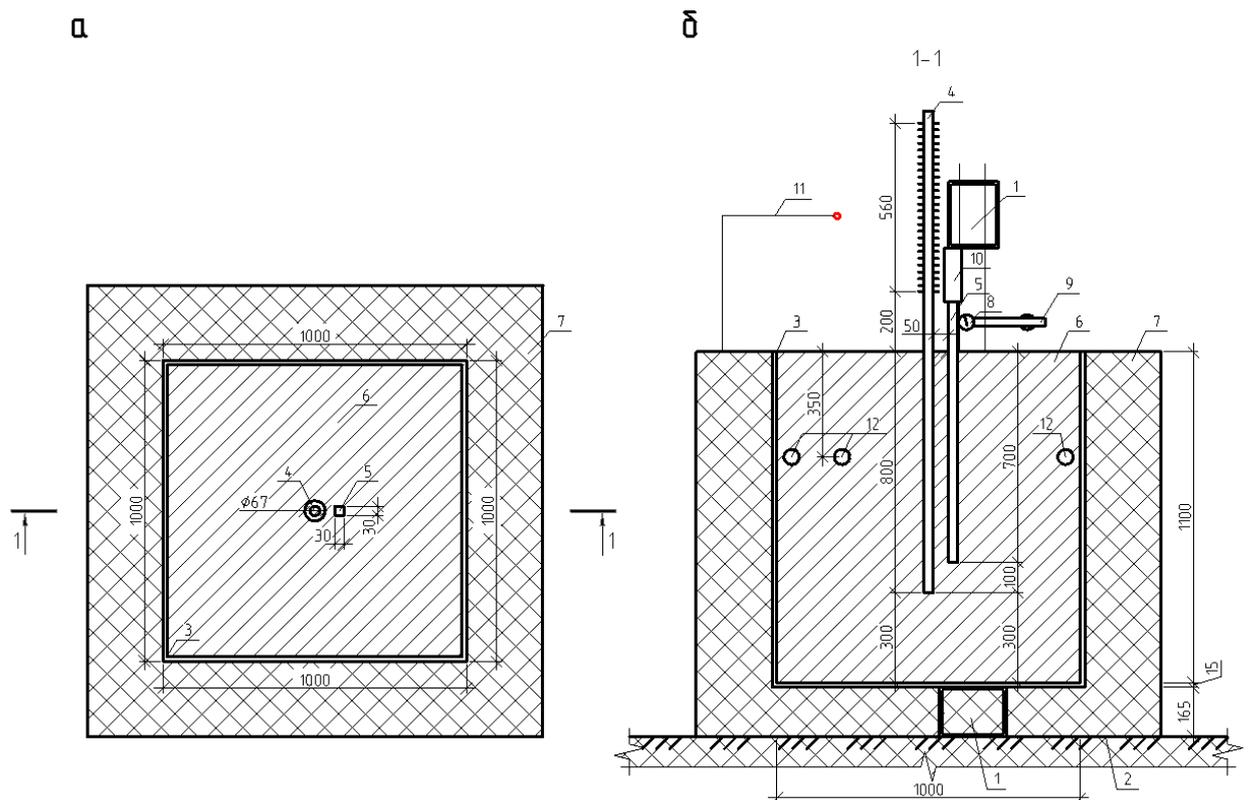


Рисунок 2.1. Схема экспериментального стенда: а – в плане, б – в разрезе
 (1 – система для нагружения сваи; 2 – утепленный пол климатической камеры;
 3 – корпус стенда; 4 – СОУ (не использовался на первом этапе); 5 – ЖБ свая; 6 – суглинок;
 7 – теплоизоляция; 8 – индикаторы ИЧ-50; 9 – реперная система; 10 – домкрат;
 11 – штатив с датчиком температуры воздуха; 12 – система подачи воды (УГВ))

Стенд представлен грунтовым лотком с жесткими боковыми стенками и дном с внутренними размерами $1 \times 1 \times 1,1(h)$ м. Боковые стенки и дно лотка из фанеры обшивались утеплителем ($\rho = 35$ кг/м³, $\lambda = 0,029$ Вт/(м·К)) толщиной 0,35 м для моделирования одностороннего и плоскопараллельного промерзания. На боковые стенки и дно лотка наносили тонкий слой солидола с последующим размещением двойного слоя полиэтиленовой пленки толщиной 150 мкм для сохранения заданной влажности грунтов основания и минимизации сил трения

грунта о боковые стенки. Процесс сборки экспериментального стенда для лабораторных исследований представлен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2. Сборка экспериментального стенда в лабораторных условиях

Модель сваи выполнена из железобетона в геометрическом масштабе 1:10 к натурным размерам: поперечное сечение 3×3 см, общая длина 80 см. Общий вид сваи представлен на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3. Общий вид сваи: а – продольный, б – поперечный

Для термостабилизации талого грунтового основания использовали одиночное вертикальное парожидкостное СОУ, изготовленное научно-производственным объединением «Фундаментстройаркос». Основные технические параметры СОУ отражены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Основные технические параметры СОУ

Параметр	Ед. изм.	Значение
Общая длина	см	160
Длина подземной части	см	100
Диаметр корпуса	мм	33,7·3,5
Диаметр оребрения	см	6,7
Поверхность надземной части, не менее	м ²	1,15
Поверхность подземной части, не менее	м ²	0,106
Материал оребрения		алюминий
Материал подземной части	–	Сталь 09Г2С
Рабочее давление в СОУ, не более	МПа	0,4
Масса СОУ, не более	гр	5500
Хладагент		аммиак
Масса хладагента	кг	0,05±0,01
Защитное покрытие: ТНЦ 80-1 ГОСТ 9.304-87	–	–

СОУ представлено единой неразъемной конструкцией (рис. 2.4), которая состоит из испарительной, конденсаторной и транспортной частей.

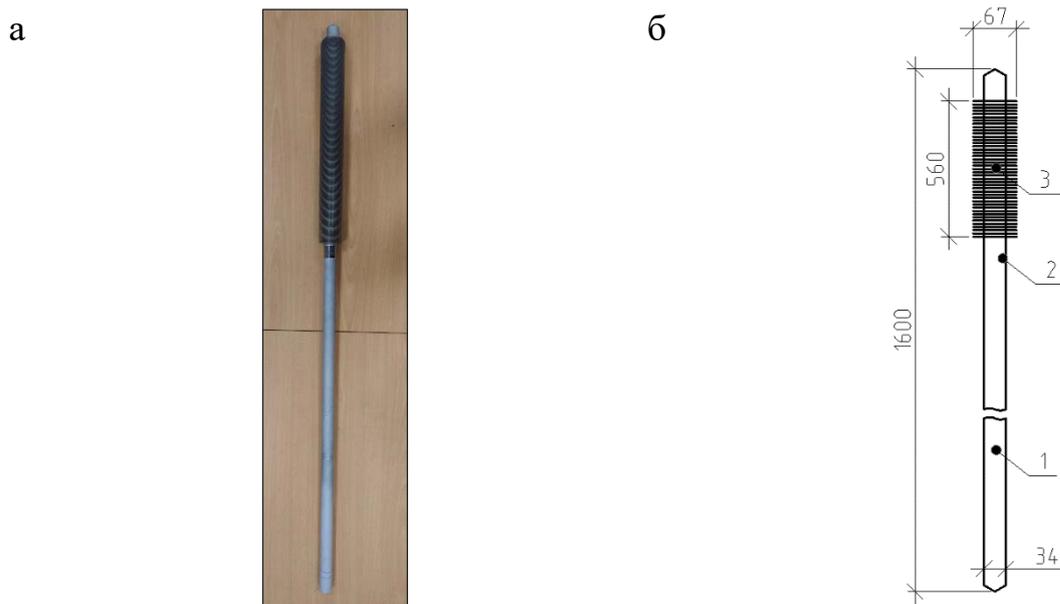


Рисунок 2.4. СОУ: а – общий вид, б – схема; на схеме: 1 – испарительная часть; 2 – транспортная часть; 3 – конденсаторная часть

Основные теплопередающие параметры лабораторного СОУ в «момент запуска» определены по методике, разработанной Кроником Я.С. и Ибрагимовым Э.В. (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Основные теплопередающие параметры СОУ

Наименование	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Температура грунта	$t_{гр}$	°С	5
Температура атмосферы	t_a	°С	-13,7
Площадь испарительной части	$F_{и}$	м ²	0,0846
Длина испарительной части	H_e	см	80
Площадь конденсаторной части	S_k	м ²	1,18
Длина конденсаторной части	$H_{и}$	см	56
Коэффициент теплопередачи от грунта к атмосфере	$K_{и}$	Вт/(м ² ·°С)	15,615
Термическое сопротивление от внешней поверхности конденсатора к окружающему воздуху	R_a	°С/Вт	0,0974
Термическое сопротивление термостабилизатора	R_o	°С/Вт	0,034
Термическое сопротивление от окружающего грунта к поверхности испарителя	$R_{гр}$	°С/Вт	0,625
Теплопроводность талого грунта	$\lambda_{гр}$	Вт/м·°С	1,45
Радиус термостабилизатора	r_T	м	0,01685
Диаметр термостабилизатора	d_T	м	0,0337
Коэффициент теплообмена	α_m	Вт/(м ² ·°С)	8,7
Скорость ветра	v	м/с	0,01
Тепловой поток, передаваемый от грунта к атмосфере	Q	Вт	24,72
Плотность теплового потока	q	Вт/м ²	292,013
Линейная плотность теплового потока	q	Вт/м	30,9

При проведении экспериментов грунтовое основание устраивали из суглинка нарушенной структуры, плотностью $\rho_d = 1510\text{--}1540 \text{ кг/м}^3$ и влажностью $W = 32\text{--}35 \%$. Основные характеристики суглинка представлены в таблицах 2.3, 2.4.

Таблица 2.3. Теплофизические характеристики грунта основания

λ_f , Вт/(м·°С)	λ_{th} , Вт/(м·°С)	C_f , кДж/(м ³ ·°С)	C_{th} , кДж/(м ³ ·°С)	L_v , МДж/м ³
1,80	1,59	2805,58	3332,68	84,83

Примечание: в таблице 2.3. приняты следующие обозначения: λ_f – теплопроводность грунта в мерзлом состоянии; λ_{th} – теплопроводность грунта в талом состоянии; C_f – удельная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии; C_{th} – удельная теплоемкость грунта в талом состоянии; L_v – теплота таяния (замерзания) грунта.

Таблица 2.4. Физические характеристики грунта основания

Показатель	Значение
Плотность грунта, г/см ³	1,959
Плотность сухого грунта, г/см ³	1,540
Плотность частиц грунта, г/см ³	2,710
Коэффициент пористости, д.ед.	0,659
Число пластичности, д.ед.	12,8
Показатель текучести, д.ед.	0,93
Влажность грунта, %	29-33
Влажность на границе текучести, %	30,1
Влажность на границе раскатывания, %	17,3
Степень водонасыщения, д.ед.	0,822
Угол внутреннего трения, °	12
Удельное сцепление, МПа	0,019

Нагрузку на сваю передавали ступенями при помощи механического домкрата, упирающегося в стальную раму. Для фиксации значений нагрузок при нагружении сваи использовали динамометр ДИН-1, представленный на рисунке 2.5. Схема работы динамометра заключается в деформации упругого элемента на тензорезисторном мосте от действия внешней нагрузки. Таким образом, происходит разбаланс тензорезисторного моста, обусловленный возникающими деформациями упругого элемента. Данные о происходящем разбалансе передаются в электронный блок для дальнейшего преобразования и обработки.



Рисунок 2.5. Динамометр ДИН-1: а – электронный блок; б – силоизмерительный датчик

Для определения деформированного состояния при проведении экспериментов фиксировались перемещения грунтового основания путем

установки независимой реперной системы из металлических уголков, на которую крепились индикаторы часового типа при помощи магнитных стоек. Измерения перемещений сваи и конструкции СОУ производились индикаторами часового типа ИЧ-50 (рис. 2.6, а) с ценой деления 0,01 мм. Величину перемещений слоев грунтового основания измеряли модифицированными индикаторами часового типа ИЧ-10 с точностью 0,1 мм (рис. 2.6, б) при помощи погруженных в основание грунтовых марок (рис. 2.6, в), к которым крепилась стальная струна диаметром 0,3 мм, соединенная с индикаторами. Схема расположения индикаторов часового типа и грунтовых марок представлена на рисунке 2.12.



Рисунок 2.6. Измерение перемещений: а – индикатор часового типа ИЧ-50; б – модифицированный индикатор часового типа ИЧ-10; в – грунтовая марка

Значения общих напряжений в грунтовом основании определяли при помощи тензометрических месдоз мембранного типа. Месдозы изготавливали по алгоритму, представленному в научных трудах А.В. Голли [59, 60]. Регистрирующей аппаратурой являлась тензостанция ZETLAB (ZET 017-T8) с программным обеспечением ZETLAB TENZO для работы на персональном компьютере. Для изготовления корпусов месдоз, диаметр которых равен 30 мм (рис. 2.7, а), использовали титановый сплав. При сборке месдоз использовали две отдельные универсальные мембраны, толщины которых равны 0,2 мм, соединенные по типу «паз-гребень». Герметичность соединения «паз-гребень» обеспечивалась при помощи эпоксидного клея.

При изготовлении месдоз использовали фольговые тензорезисторы марки 2ФКПА с базой 5 мм и внутренним сопротивлением 200 Ом (рис. 2.7, б). Приклеивание тензорезисторов к поверхности мембраны осуществлялось

цианоакрилатным клеем. Фотография собранной мездозы представлена на рисунке 2.7, в.



Рисунок 2.7. Изготовление мездоз: а – корпус мездозы; б – приклеивание тензорезистора; в – общий вид мездозы

После завершения процесса сборки была проведена тарировка мездоз в специально собранном металлическом баке – барокамере. Мездозы тарировали при температуре, близкой к температуре грунтов основания в экспериментальном стенде. При выполнении тарировочных работ одновременно проверяли герметичность мездоз путем повышения давления воздуха с помощью компрессора. При производстве тарировочных работ проводили так называемую «тренировку» мездоз – многократные циклы (более 40 циклов) нагрузки и разгрузки до момента совпадения нулевых и максимальных значений по данным с мездоз в диалоговом окне программы ZETLAB TENZO.

При производстве тарировочных работ давление в барокамере повышали постепенно (ступенчато), число ступеней принято не менее двадцати. После достижения максимального значения нагрузки производили ступенчатую разгрузку до нулевых значений. Процесс тарировки мездоз был произведен трижды. Контрольно-измерительная аппаратура и приборы, используемые при тарировке, представлены на рисунке 2.8. По результатам тарирования мездоз построены тарировочные графики, по которым определяли линейность работы, точность измерения и гистерезис датчиков.

а



б



в

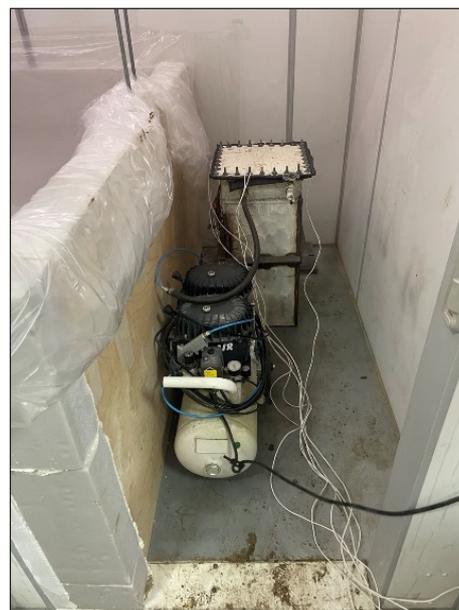


Рисунок 2.8. Общий вид процесса тарировки месдоз:

а – тарировка при положительной температуре; б – расположение месдоз в тарировочном баке; в – тарировка месдоз при отрицательной температуре в климатической камере

Месдозы для измерения напряжений укладывали параллельно с послойным устройством грунтового основания. Укладку проводов датчиков напряжений (месдоз) производили «змейкой» для недопущения натяжения и обрывов, а также для минимизации влияния проводов на НДС грунтового основания. Схема расположения месдоз представлена на рисунке 2.12.

Мониторинг температуры грунтового основания производили термоэлектрическими термопарами (рис. 2.9, б) типа ТХК(L) по ГОСТ Р 8.585-2001 при помощи измерителя температуры многоканального ИТ-6 (рис. 2.9, а) производства АО «НПП «Эталон». Интерфейс измерителя позволяет подключаться к персональному компьютеру для съема данных температуры при помощи специализированного программного обеспечения. Схема расположения термоэлектрических термопар представлена на рисунке 2.12.

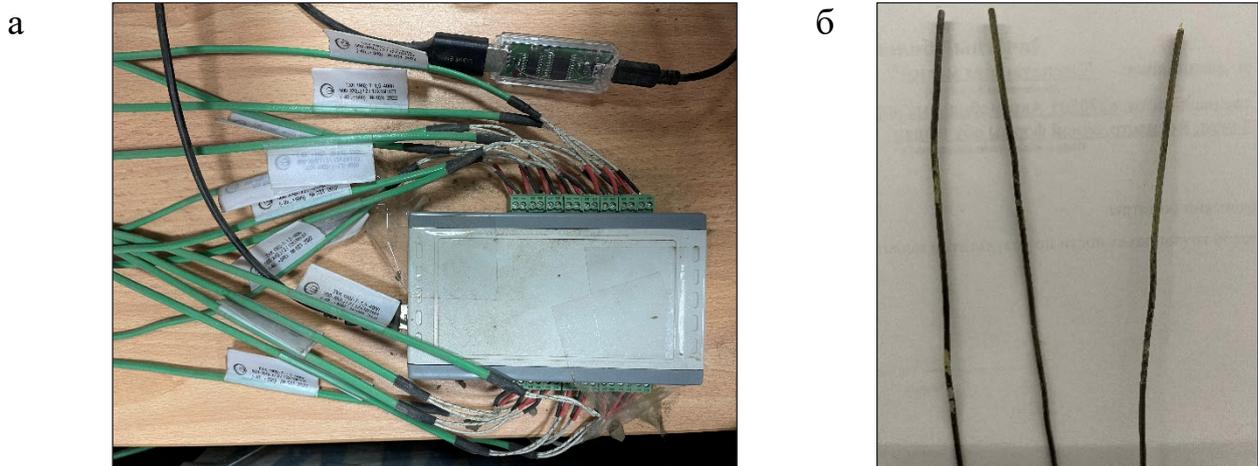


Рисунок 2.9. Измеритель температуры многоканальный ИТ-6 (а); термоэлектрические термопары типа ТХК(L) (б)

Для моделирования температурных условий использовали холодильную сплит-систему POLAIR Standard (рис. 2.10). Холодильная камера позволяет моделировать температуру воздуха в диапазоне от -20 до $+20$ °С.



Рисунок 2.10. Холодильная сплит-система POLAIR Standard

2.3. Проведение лабораторных исследований

Для определения динамики увеличения несущей способности сваи проведение лабораторных экспериментов проходило в два этапа:

- первый: испытание талого суглинка сваей статической вдавливающей нагрузкой (СОУ не использовался);
- второй: испытания термостабилизированного суглинка сваей статической вдавливающей нагрузкой в конце первого – четвертого летних периодов (сентябрь – октябрь).

На первом этапе проведены подготовительные виды работ. Суглинок нарушенной структуры послойно по 100 мм укладывали в стенд с удалением всех включений крупнее 2 мм и уплотнением статической нагрузкой. Статическая нагрузка при консолидации слоя грунтового основания составляла $1,5 \text{ кН/м}^2$. Перед загрузкой последующего слоя поверхность предыдущего уплотненного слоя взрыхляли ножом на глубину 6–8 мм. Процесс заполнения и уплотнения грунтового основания представлен на рисунке 2.11.



Рисунок 2.11. Послойная укладка грунта с последующей консолидацией

В процессе заполнения экспериментального стенда для контроля влажности грунтового основания после уплотнения и консолидации каждого слоя грунта отбирали пробы режущим кольцом согласно [66]. Параллельно с послойным заполнением стенда грунтовой пастой производили погружение грунтовых марок, термопар и установку месдоз. После заполнения стенда грунтовой пастой произвели вдавливание сваи на глубину 70 см и установку СОУ на глубину 80 см (пята сваи находится выше нижней отметки СОУ на 10 см,

рис. 2.1). Схема расположения контрольно-измерительного оборудования представлена на рисунке 2.12.

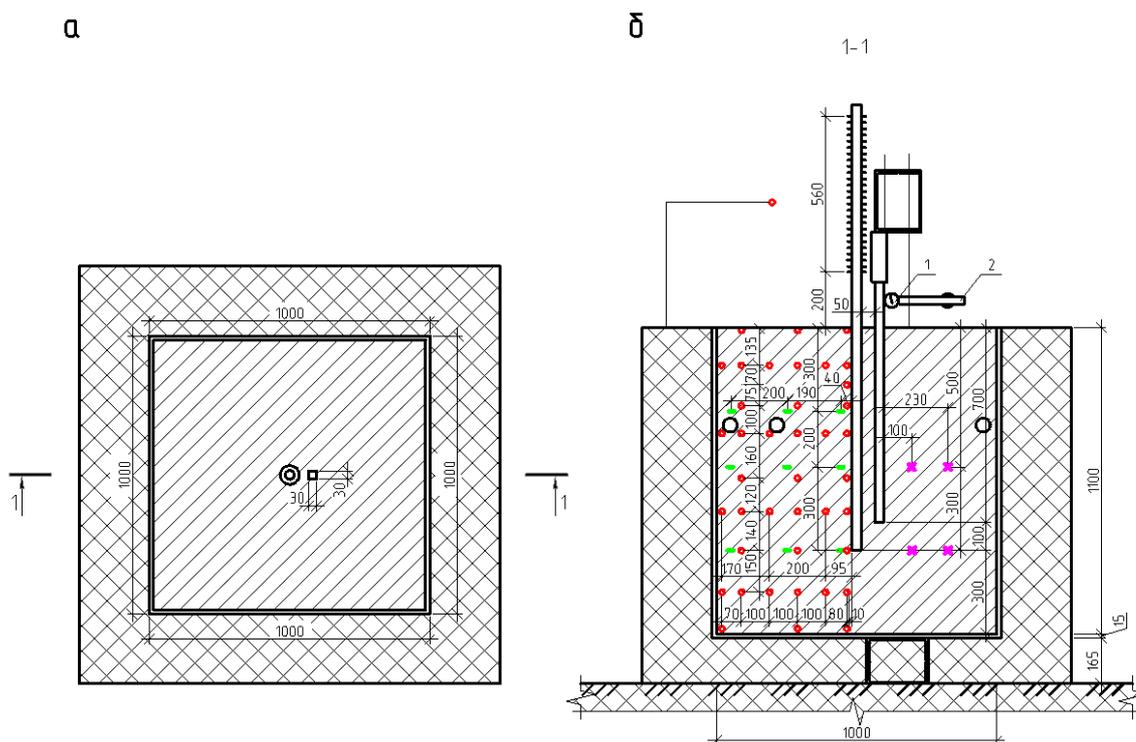


Рисунок 2.12. Схема расположения контрольно-измерительного оборудования:
 а – в плане, б – в разрезе (1 – индикаторы ИЧ-50; 2 – реперная система;
 ○ – датчик температуры грунта/ воздуха; — — месдоза; × – грунтовая марка)

Марки вертикальных перемещений погружали на глубину 50–80 см от дневной поверхности грунта. Марки располагались на расстоянии 10–33 см от боковой поверхности СОУ. Месдозы располагали горизонтально на глубине 30–80 см от дневной поверхности грунта и на расстоянии 4–43 см от боковой поверхности СОУ. Фотографии расположения месдоз на глубине 54 см от дневной поверхности представлены на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13. Общий вид расположения месдоз в экспериментальном стенде

«Открытую» систему УГВ (уровень грунтовых вод) моделировали посредством расположения на глубине 0,35 м от дневной поверхности грунтового основания (с учетом принятого геометрического масштаба M_T равного 1:10) магистральной системы из перфорированных пластиковых труб. Контроль УГВ производили при помощи погружения щупа в заливную трубу магистральной системы.

После завершения подготовительных видов работ моделировали талое температурностабилизированное грунтовое основание в «открытой» системе с температурой грунта $T = 0,4-0,6$ °С. На рисунке 2.14 представлен общий вид экспериментального стенда, находящегося в морозильной камере, с поддерживаемой температурой воздуха $T = 0$ °С в период температурной стабилизации грунтового основания.



Рисунок 2.14. Общий вид экспериментального стенда

При проведении лабораторных экспериментов объектом исследований являлось термостабилизируемое основание, сложенное суглинистыми грунтами, с погруженной в него сваей и конструкцией СОУ. Предметом исследований являлись температурный режим и НДС грунтового основания с погруженной в него сваей при термостабилизации вертикальным СОУ и действии вертикальных статических вдавливающих нагрузок. Было проведено 3 серии лабораторных экспериментов.

После завершения стабилизации температуры грунтового основания по всему объему путем фиксирования температуры грунта в экспериментальном стенде в диапазоне $0-0,6$ °С производили испытание талого суглинка сваей согласно ГОСТ 5686-2020. При проведении статических испытаний параметр времени масштабировали согласно выше принятому значению. Модель сваи нагружали ступенчато по 500 г, каждую ступень нагружения выдерживали до стабилизации деформаций, не превышающих 0,1 мм за последние 120 мин. наблюдений согласно п.8.2.3 ГОСТ 5686-2020.

При приложении ступени нагружения проводили снятия показаний с индикаторов перемещений в следующей последовательности:

1. Снятие нулевых показаний до приложения нагрузки (нулевой отсчет);
2. Снятие показаний сразу после приложения нагрузки (первый отсчет), далее три последовательных отчета с интервалом 0,5 ч и в последующем

через каждые 60 мин. до условной стабилизации деформаций (п. 8.2.2, ГОСТ 5686-2020 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями»).

После завершения испытания производили разгрузку свай двойными ступенями нагрузки со снятием показаний сразу после снятия нагрузки и через 15 мин. наблюдений. Длительность ступени разгрузки принята не менее 15 мин. После завершения разгрузки до нуля снятия показаний упругих перемещений сваи продолжали в течение часа, с интервалом снятия каждые 15 мин. (п. 8.2.6 ГОСТ 5686-2020 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями»). В результате проведения первого этапа получен график зависимости осадки сваи от нагрузки в талых суглинках (рис. 2.15).

После завершения первого этапа был осуществлен переход от стационарного температурного режима к нестационарному с установлением в климатической камере средней температуры воздуха г. Лабытнанги по данным многолетних наблюдений (табл. 2.5) с учетом глобального потепления климата за период отрицательных и положительных температур (второй этап исследования).

Таблица 2.5. Среднемесячная температура воздуха

Месяц	Температура воздуха, °С
Январь	-24,1
Февраль	-23,1
Март	-15,1
Апрель	-8,6
Май	-0,8
Июнь	9,2
Июль	14,6
Август	11,2
Сентябрь	5,4
Октябрь	-3,8
Ноябрь	-14,9
Декабрь	-20,3

Длительность теплового и холодного периодов принята согласно методике, представленной в научных трудах Карлова В.Д. [89]. По методике Карлова В.Д. геометрический масштаб равен квадрату временного масштаба. Продолжительность зимнего периода в натуральных условиях составила 5448 ч, а летнего – 3312 ч. Согласно принятому масштабу времени продолжительность холодного периода равна 54,48 ч при температуре $T_{f,m} = -13,8$ °С, а теплового

периода – 33,12 ч при температуре $T_{th,m} = +10,1$ °С. В конце летних периодов производили испытания термостабилизируемых суглинков сваей, согласно ГОСТ 5686-2020.

При статическом испытании талых и термостабилизируемых грунтов сваей фиксировались показания с месдоз и грунтовых марок вертикальных перемещений, описание которых представлено в параграфе 2.2. Также в период проведения экспериментальных исследований производили почасовой съем данных с термопар (температурные датчики).

Испытания термостабилизируемых грунтов сваей производили в конце первого – четвертого летних периодов (сентябрь – октябрь), согласно ГОСТ 5686-2020, после цикла зимней термостабилизации. Нагрузку на сваю передавали ступенчато. Нагружение испытуемой сваи проводили ступенями нагрузки продолжительностью 24 ч каждая (п. 9.3.1 ГОСТ 5686-2020). Параметр времени масштабировали согласно выше принятому значению. При приложении ступени нагружения снимали показания с индикаторов перемещений в следующей последовательности:

1. перед началом приложения нагрузки (нулевой отсчет);
2. после приложения первой ступени нагружения (первый отчет), далее через 30 мин; 60 мин; 2; 4; 8; 16 и 24 ч и далее с интервалами 24 ч (п. 9.2.3 ГОСТ 5686-2020).

Нагружение сваи производили до момента увеличения осадки с увеличивающейся скоростью без увеличения величины нагрузки. После завершения испытания производили разгружение сваи удвоенными ступенями нагружения. Длительность ступени разгружения принята не менее 15 мин. В результате проведения второго этапа исследований получены графики зависимости осадки сваи от нагрузки (рис. 2.15) в конце первого – четвертого летних периодов (сентябрь – октябрь).

2.4. Анализ результатов лабораторных исследований

По результатам проведенных лабораторных исследований построены графические зависимости осадки сваи S от нагрузки F , представленные на рисунке 2.15.

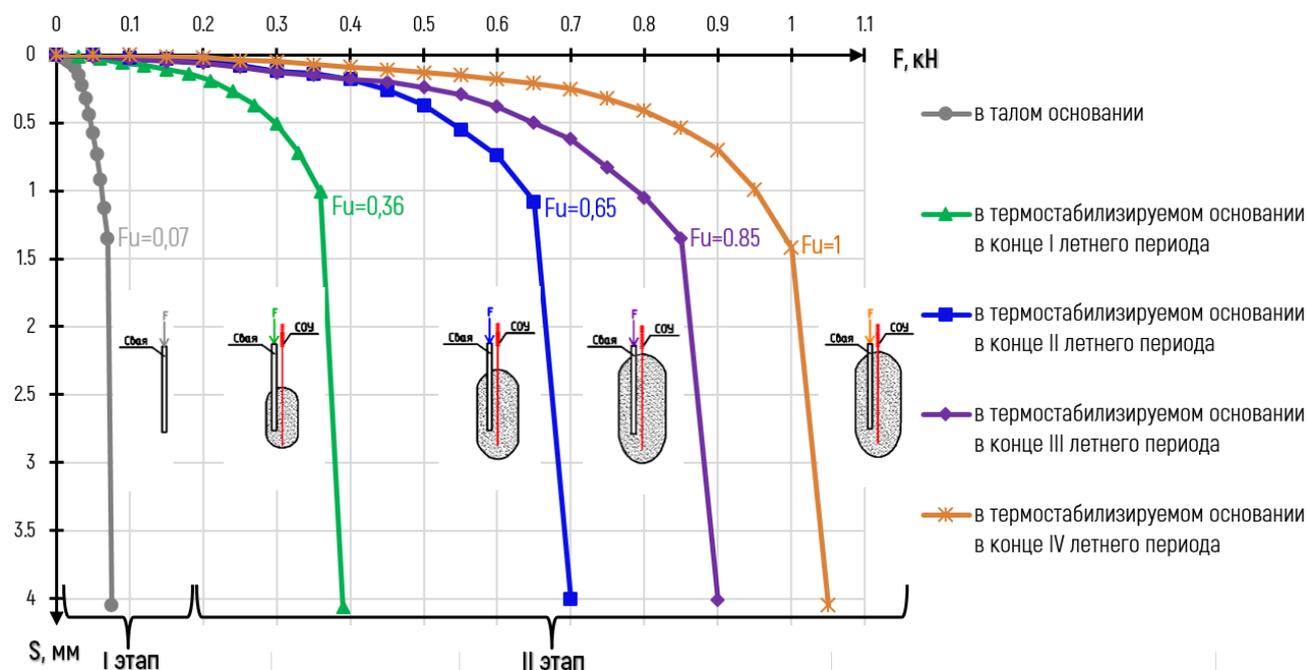


Рисунок 2.15. Графики зависимости осадки сваи S от нагрузки F на разных этапах (в разные периоды) эксперимента

Обработанные результаты статических испытаний суглинка свай (по данным графиков «осадки-нагрузки» (рис. 2.15)) на разных этапах и в разные периоды эксперимента представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6. Результаты статических испытаний

Наименование	В талом основании (этап № 1)	В термостабилизируемом основании (этап № 2):			
		в конце I летнего периода	в конце II летнего периода	в конце III летнего периода	в конце IV летнего периода
Нормативное значение предельного сопротивления сваи и частное значение предельно длительного сопротивления сваи, кН	0,07	0,23	0,42	0,55	0,65
Несущая способность сваи, кН	0,07	0,21	0,38	0,50	0,59
Прирост несущей способности к предыдущему значению, %	–	203,9	80,6	30,2	18,2

Термостабилизация талого грунтового основания позволила увеличить несущую способность сваи с 0,07 до 0,59 кН за счет формирования мерзлого грунтового ядра вокруг сваи (рис. 2.16), работающего совместно с нею (по данным перемещений сваи и грунтовых марок, расположенных в ядре и за его пределами) и увеличивающего ее боковую и лобовую поверхности. Максимальный прирост (203,9 %) несущей способности сваи произошел в конце первого летнего периода. Начиная с четвертого летнего периода прирост несущей способности сваи составил не более 20 %, что свидетельствует о формировании условного температурного равновесия в грунтовом основании.

По результатам анализа температурных данных с термопар построены графики распределения температуры грунта у боковой поверхности сваи и контур формируемого мерзлого ядра (определенный по величине температуры начала замерзания грунта основания) на разных этапах эксперимента (рис. 2.16).

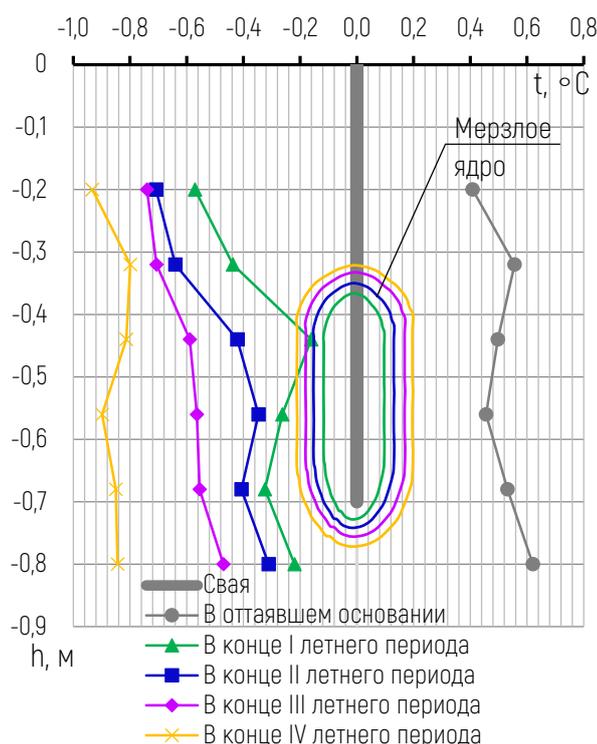


Рисунок 2.16. График распределения температуры грунта у боковой поверхности сваи на разных этапах с контуром формируемого мерзлого грунтового ядра

В соответствии с температурными графиками (рис. 2.16) средняя температура грунта по боковой поверхности смерзания сваи в конце первого, второго третьего и четвертого летних периодов равна $-0,33$; $-0,47$; $-0,6$; $-0,85$ °C соответственно.

2.5. Выводы по главе 2

По результатам проведенных лабораторных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Изучение процесса термостабилизации талого грунтового основания в лабораторных условиях показало эффективность применения данного метода для увеличения несущей способности модели сваи.
2. В результате проведенных лабораторных экспериментов выявлено, что при термостабилизации талого грунтового основания одиночным вертикальным СОУ вокруг сваи формируется мерзлое грунтовое ядро, основными характеристиками которого являются диаметр d , высота h и объем V .
3. Установлена динамика увеличения несущей способности сваи в грунтовом основании при термостабилизации одиночным вертикальным СОУ. Увеличение несущей способности сваи обусловлено увеличением контактной боковой и лобовой поверхностей за счет формирования мерзлого грунтового ядра.

Следует отметить, что полученные в ходе проведения лабораторных исследований положительные результаты по увеличению несущей способности модели сваи имеют скорее качественный характер, определяющий поведение и особенности работы сваи в процессе ее статического нагружения в термостабилизируемом основании, представленном тальми суглинками, в «открытой» системе (с подтоком воды). Результаты лабораторных исследований легли в основу проведения прогнозных температурных расчетов и натурного экспериментального исследования на площадке карбонового полигона «Семь Лиственниц» Научного центра изучения Арктики вблизи г. Лабытнанги (ЯНАО).

ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСАДКИ ОДИНОЧНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ СВАИ В ТЕРМОСТАБИЛИЗИРУЕМОМ ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ

3.1 Постановка задачи и анализ научно-технической литературы

На основании проведенных лабораторных исследований (см. главу 2) и обзора научно-технической литературы, установлено, что при термостабилизации грунтового основания вокруг погруженной в него сваи формируется мерзлое грунтовое ядро. Формирование ядра вокруг сваи, работающего совместно с нею, приводит к увеличению ее несущей способности за счет увеличения контактной боковой и лобовой поверхностей. Для оценки эффективности работы сваи со сформированным ядром в натуральных условиях необходимо корректно прогнозировать ее осадку.

Исследованию взаимодействия одиночной сваи с грунтовым основанием посвящено множество научных трудов. Эти работы охватывают как теоретические подходы с разработкой ключевых формул и математических моделей, так и численные методы, реализованные на базе различных программ, а также фундаментальные экспериментальные исследования. Так, до 1950 г. единственно возможным способом определения осадки одиночной сваи было проведение полевых испытаний грунтов сваями, на основе которых строили график «нагрузки - осадки». Научные исследования и труды М.Ю. Абелева, А.С. Акулецкого, В.А. Барвашова, А.А. Бартоломея, В.Г. Березанцева, А.Н. Богомолова, А.Н. Власова, Н.М. Герсевича, А.Л. Готмана, Н.З. Готман, Б.И. Далматова, К.Ю. Зарецкого, И.В. Колыбина, Ф.К. Лапшина, А.А. Луги, М.В. Малышева, Р.А. Мангушева, Н.С. Никифоровой, А.И. Полищука, А.Б. Пономарева, Я.А. Пронозина, И.И. Сахарова, А.З. Тер-Мартirosяна, У.М. Улицкого, Н.А. Цытовича, Д.Ю. Чунюка, А.Г. Шашкина, О.А. Шулятьева, J.-L. Briauda, R. Butterfielda, Y.K. Chowa, R. J. Jardine, G.G. Meyerhofa, H.G. Poulosa, M. Randolpha, A. Vesica, T. Whitakerfa и других посвящены определению осадки свай разных конструкций и форм сечения в различных грунтовых условиях. При расчете «традиционных» свайных фундаментов

осадку, как правило, определяют по методике, представленной в нормативно-технической документации, либо по данным статического зондирования или в ходе полевых испытаний грунтов сваями.

В результате проведенного анализа научно-технической литературы, существующих подходов и методик расчета осадки одиночной сваи установлено, что для определения осадки сваи со сформированным мерзлым грунтовым ядром необходима разработка аналитической методики, учитывающей характер его формирования в натуральных условиях.

3.2. Определение геометрических параметров мерзлого грунтового ядра, формирующегося вокруг сваи

Проведена серия прогнозных теплотехнических расчетов в программе Frost 3D для выявления характера формирования мерзлого грунтового ядра вокруг сваи в результате работы вертикальных термостабилизаторов в грунтовой основе. Расчеты выполнены по климатическим условиям г. Лабытнанги (ЯНАО) при варьировании следующими параметрами:

1. При использовании в качестве основания следующих грунтов: песков, супесей, суглинков и глин различной плотности (1400 и 1600 кг/м³) и влажности (20, 25 и 30 %).
2. При вводе следующих начальных температур грунтов основания $T_{нач}$: -0,1; -0,15; -0,2; 0; 1 и 2 °С.
3. При длине сваи, погруженной в термостабилизируемое основание на 9, 10, 11 м с термостабилизатором, длина испарительной части которого равна 10, 11, 12 м соответственно.

Было проведено 144 температурных расчета оттаявшего многолетнемерзлого основания, сложенного разного типа грунтами, отличающимися плотностью, влажностью и начальной температурой, с погруженной в него на разную глубину свай с термостабилизатором соответствующей длины. Размеры расчетной модели приняты 50×50×50 м. Материал сваи – железобетон, сечение 30×30 см. Работу СОУ моделировали третьим родом с учетом температуры воздуха и скорости ветра по данным

ближайшей метеостанции г. Лабытнанги. Конструктивные параметры СОУ приняты согласно паспорту технических условий завода изготовителя (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Основные технические характеристики СОУ

Основные показатели	Общая длина, м		
	12	13	14
Хладагент	углекислота		
Защитное покрытие	цинковое газотермическое		
Диаметр оребрения конденсатора, мм	67		
Материал оребрения конденсатора	алюминий		
Шаг ребер, мм	2,5		
Толщина ребер, мм	0,5		
Диаметр корпуса испарителя, мм	33,7		
Толщина стенки корпуса, мм	3,5		
Длина надземной части, м	2		
Длина теплоизоляции на испарителе, м	3 (на глубину деятельного слоя)		
Площадь конденсаторной части, м ²	1,61	2,43	2,43
Длина испарительной части, м	7	8	9
Площадь испарительной части, м ²	0,742	0,848	0,954

Длина испарительной части и, соответственно, площадь испарительной и конденсаторных частей СОУ изменялись в зависимости от длины сваи; такие параметры, как тип хладагента, материал СОУ, диаметр и толщина корпуса испарителя, длина теплоизоляции на испарителе приняты постоянными величинами.

На верхней грани расчетной модели задано граничное условие третьего рода (значения температуры воздуха и коэффициенты теплообмена с поверхностью приняты по данным ближайшей метеостанции г. Лабытнанги). На нижней и боковых гранях – граничное условие второго рода: тепловой поток, равный нулю. Моделирование выполнено без учета фильтрации грунтовых вод. В расчетах моделировали неблагоприятные климатические условия: скорость ветра принята 0 м/с. Теплофизические свойства грунтов заданы по данным приложения Б СП 25.13330.2020.

Общий вид температурного поля грунтового основания с погруженной в него на 9 м свайей с термостабилизатором, длина испарительной части которого равна 10 м, представлен на рисунке 3.1. Область, где залегает мерзлый грунт, выделена синими бергштрихами. Для практических расчетов актуален температурный режим основания в конце летнего периода (так как грунты имеют максимальную температуру в данный период).

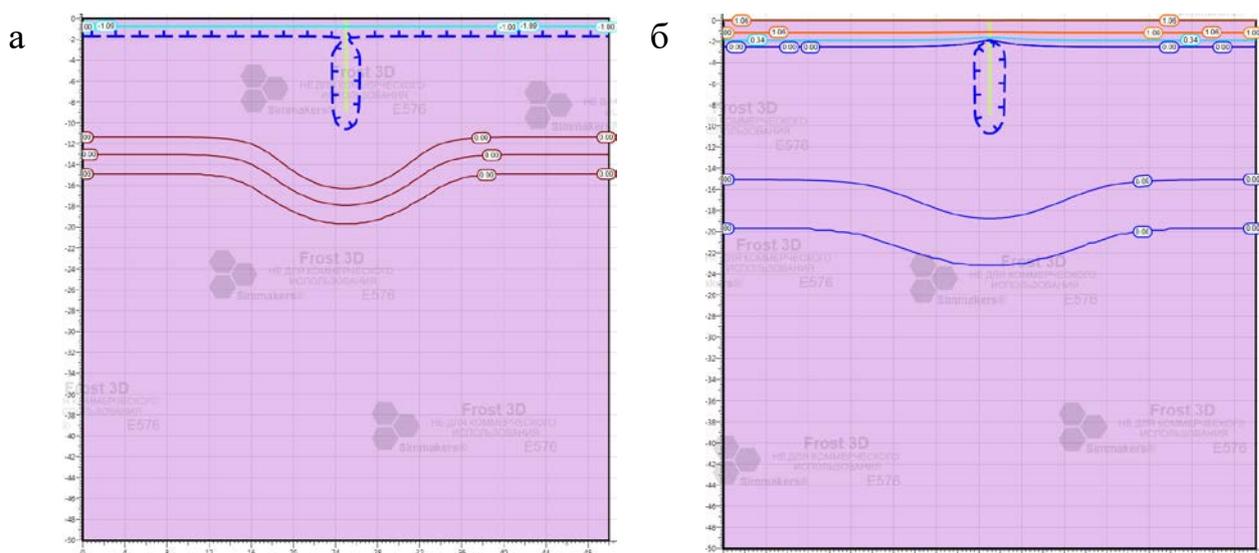


Рисунок 3.1. Температурные поля грунтового основания с погруженной в него на 9 м сваей с термостабилизатором, длина испарительной части которого равна 10 м: а) в конце зимнего периода (1 мая); б) в конце летнего периода (1 октября)

По данным изотерм грунтового основания геометрические размеры ядра с течением времени увеличиваются. Данный факт идет в запас несущей способности сваи. На рисунке 3.2 представлена конструктивная схема сваи со сформированным ядром, построенная по данным проведенных теплотехнических расчетов.

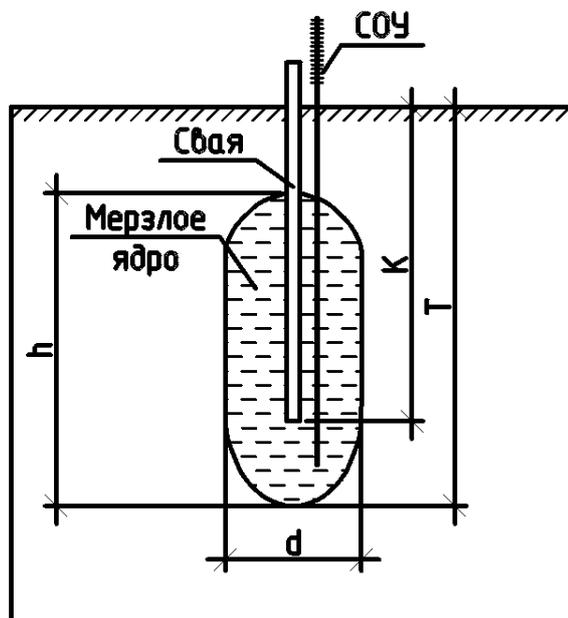


Рисунок 3.2. Конструктивная схема сваи с ядром (h – высота ядра; d – диаметр ядра; K – глубина погружения сваи; T – расстояние от дневной поверхности до подошвы ядра)

На основании проведенных численных расчетов построены графические зависимости изменения геометрических параметров (диаметра, высоты и положения) ядра, формируемого вокруг сваи, от характеристик грунтов основания.

Графическая зависимость изменения диаметра ядра, формирующегося вокруг сваи, погруженной на 9 м в термостабилизируемое основание, от характеристик грунтов основания в конце первого летнего периода представлена на рисунках 3.3–3.5.

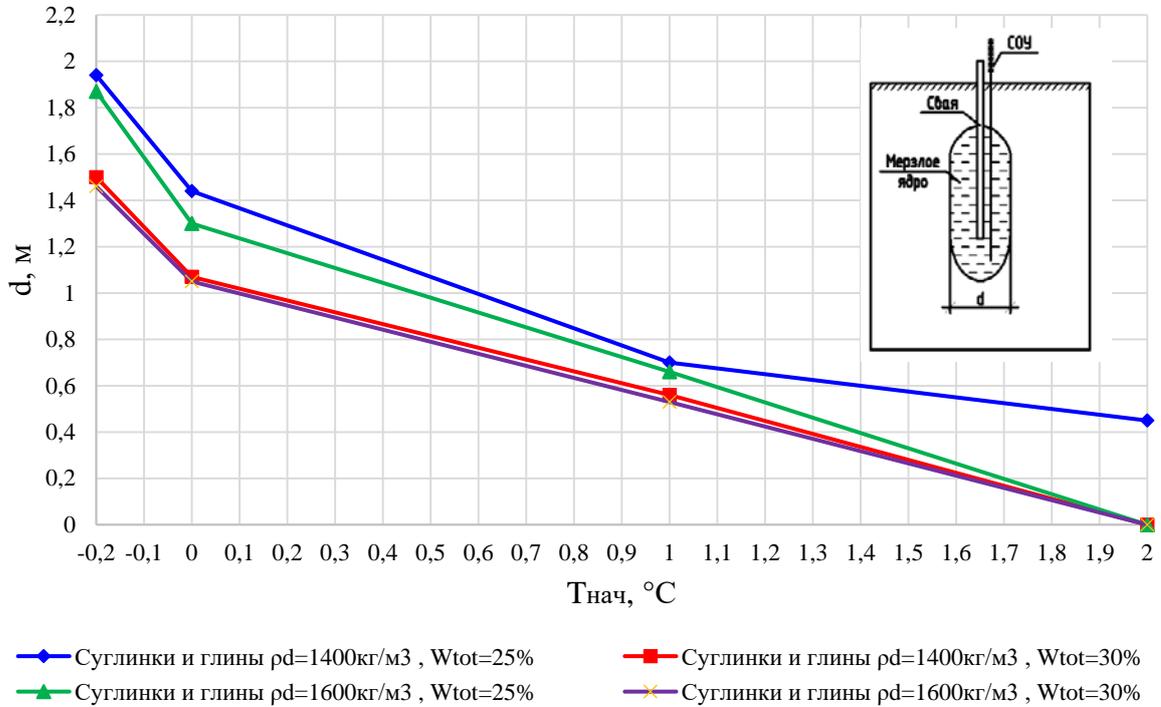


Рисунок 3.3. Изменение диаметра ядра от начальной температуры суглинков и глин

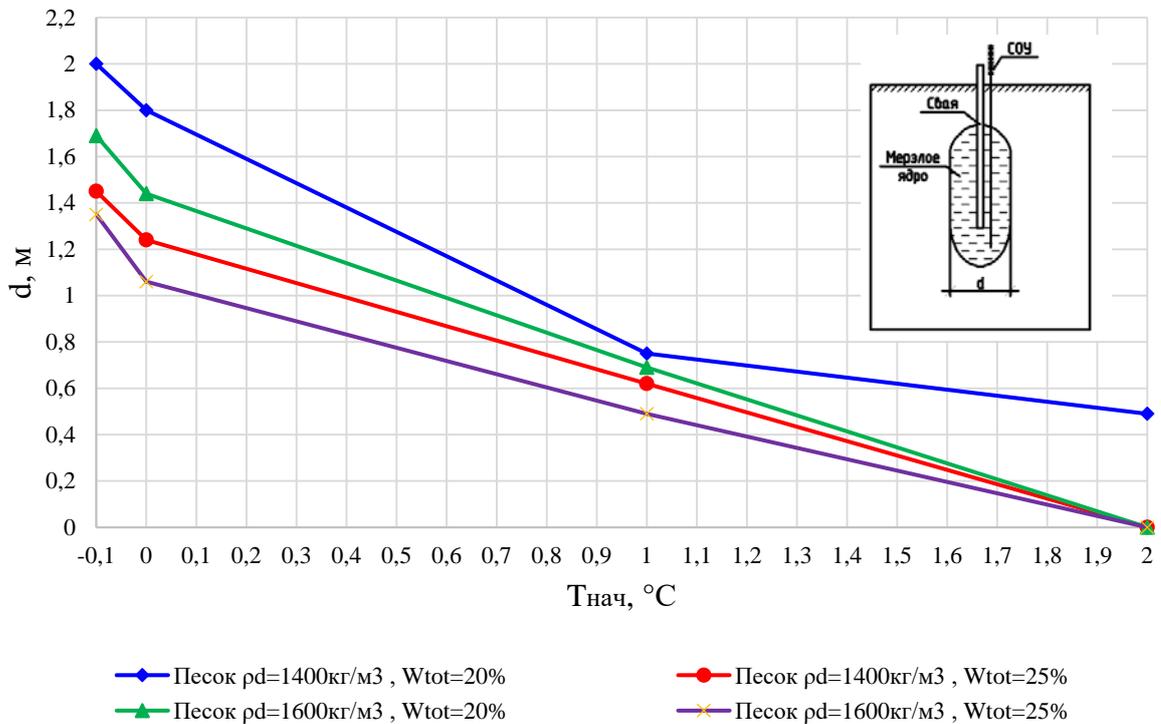


Рисунок 3.4. Изменение диаметра ядра от начальной температуры песков

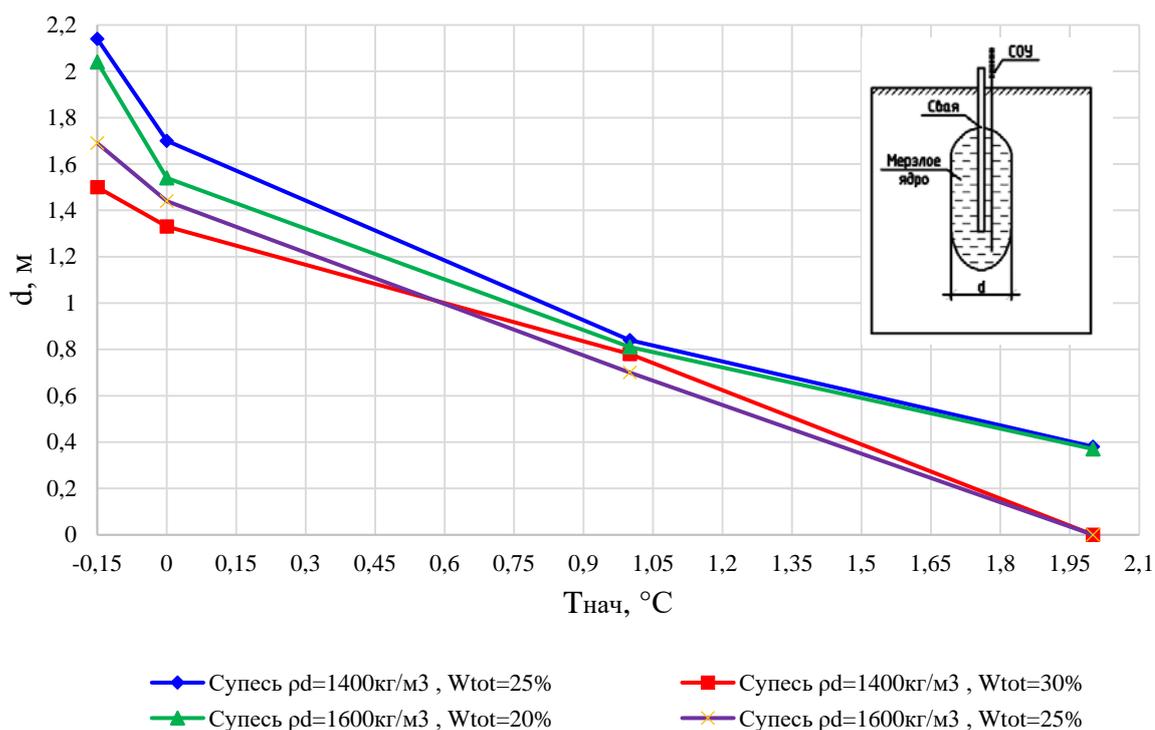


Рисунок 3.5. Изменение диаметра ядра от начальной температуры супесей

На основании графических данных (рис. 3.3–3.5) выявлено, что при монтаже СОУ у сваи, погруженной на 9 м в термостабилизируемое основание, вокруг нее формируется ядро диаметром до 2,14 м в зависимости от начальной температуры и типа грунтов основания.

На графиках (рис. 3.6–3.8) отображена зависимость изменения высоты ядра, формирующегося вокруг сваи, погруженной на 9 м в термостабилизируемое основание, от характеристик грунтов основания в конце первого летнего периода.

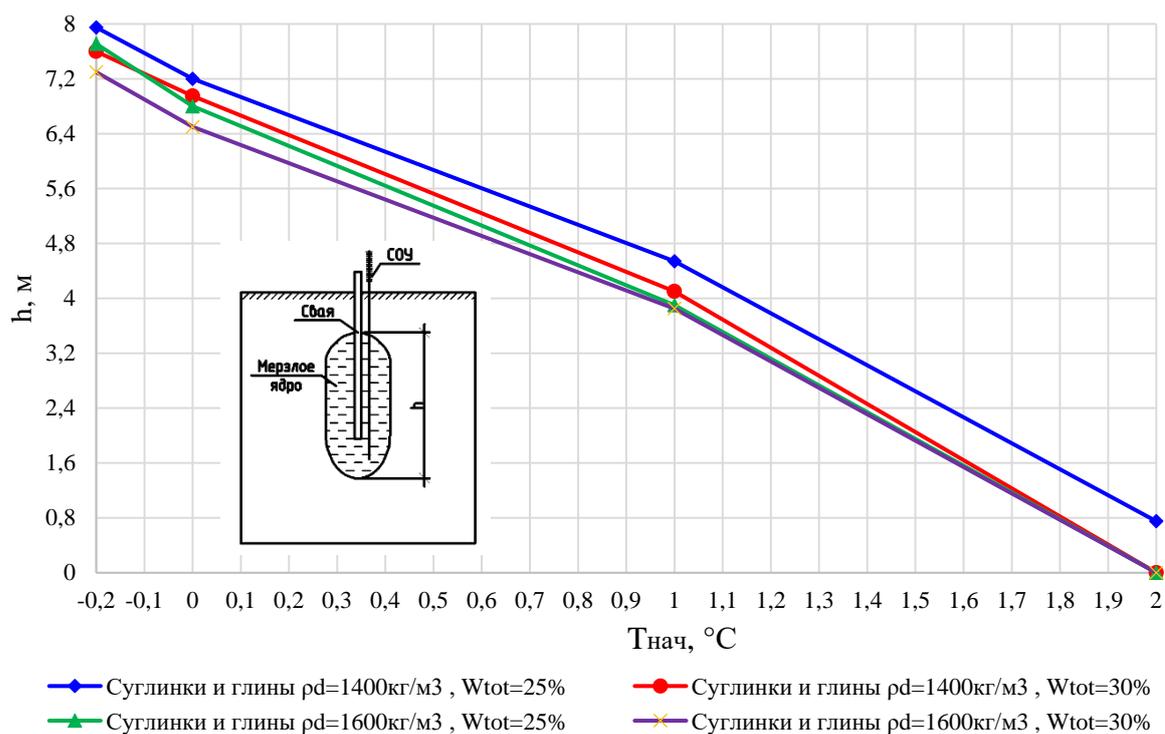


Рисунок 3.6. Изменение высоты ядра от начальной температуры суглинков и глин

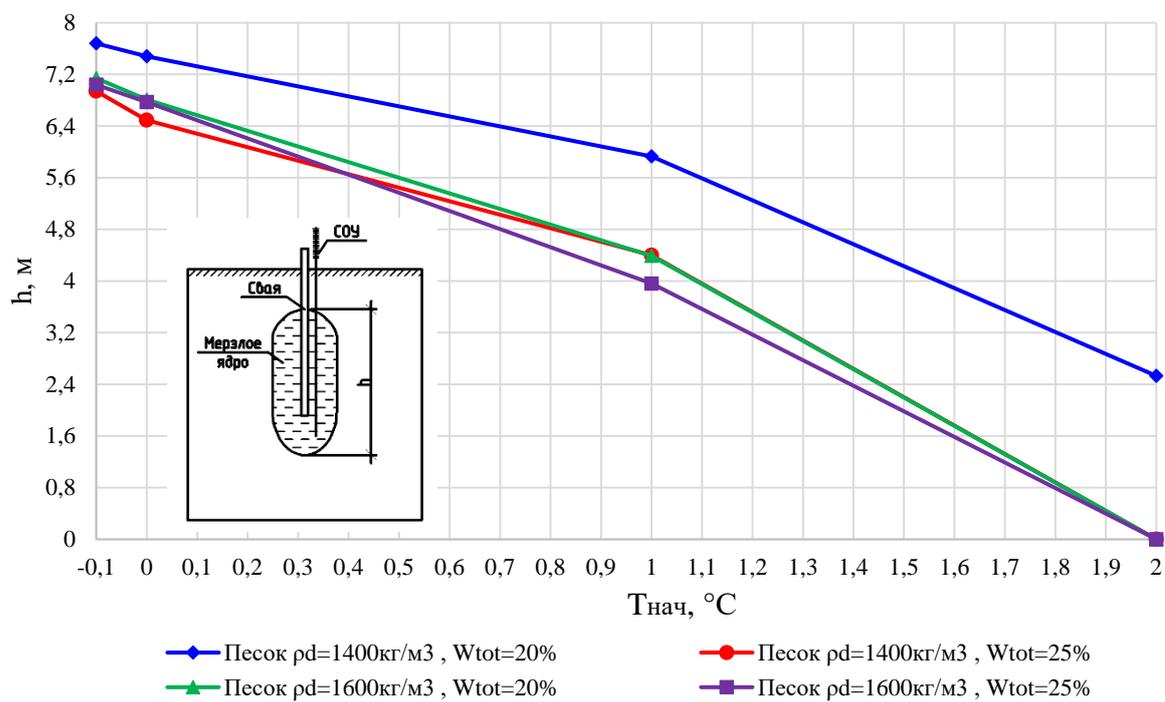


Рисунок 3.7. Изменение высоты ядра от начальной температуры песков

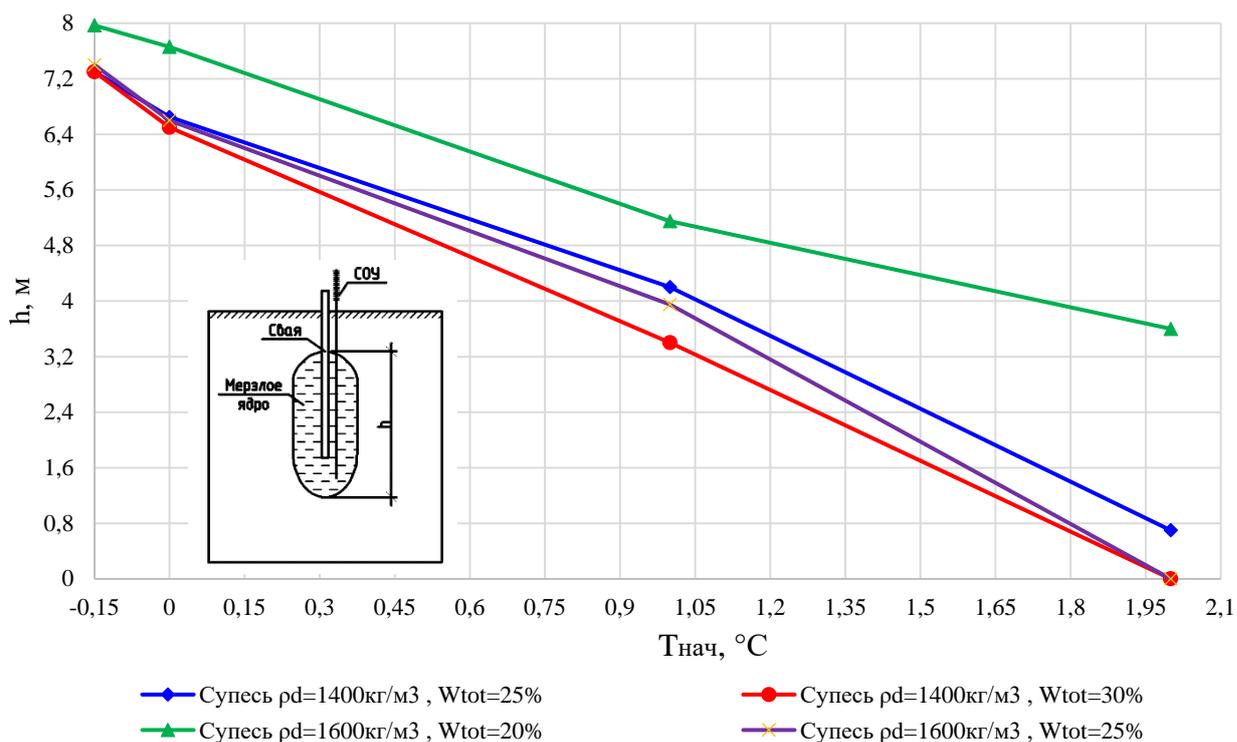


Рисунок 3.8. Изменение высоты ядра от начальной температуры супесей

По графикам (рис. 3.6–3.8) установлено, что при монтаже СОУ у сваи, погруженной на 9 м в термостабилизируемое основание, вокруг нее формируется ядро высотой до 7,97 м в зависимости от начальной температуры и типа грунтов основания.

Другим важным параметром является геометрическое положение подошвы ядра относительно пяты сваи. Графическая зависимость изменения положения подошвы ядра относительно пяты сваи, погруженной на 9 м в термостабилизируемое основание, представлена на рисунках 3.9–3.11. Оранжевая линия «Т-К=0» – это положение, когда подошва ядра и пята сваи находятся в одном уровне.

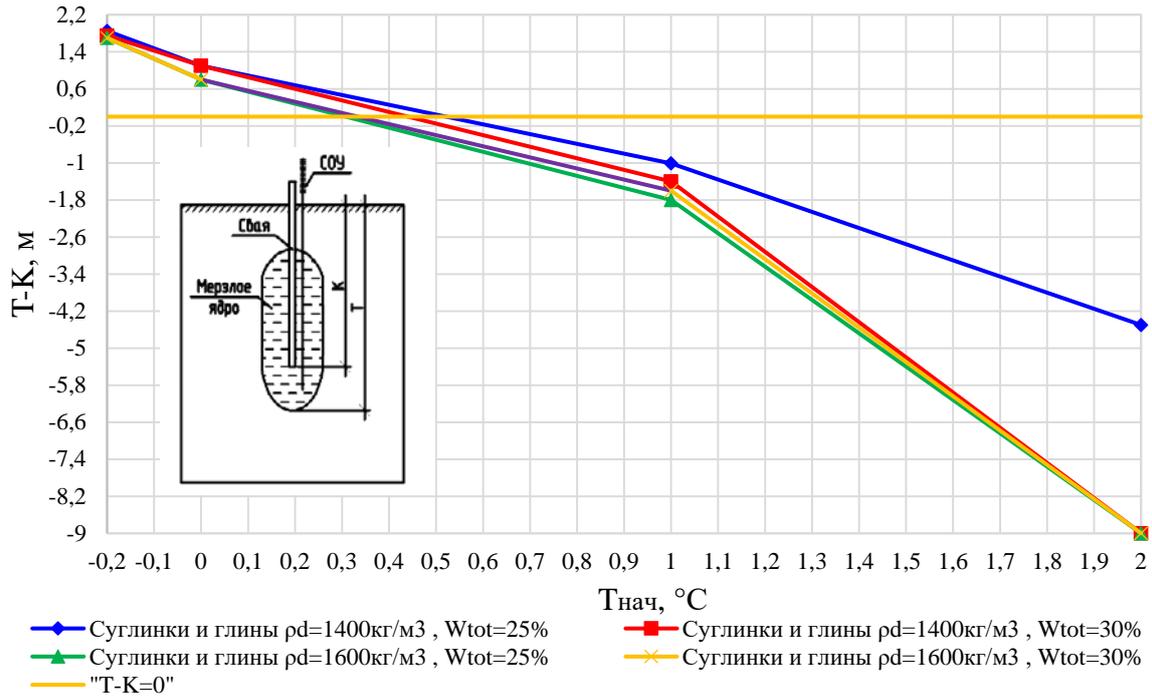


Рисунок 3.9. Изменение положения подошвы ядра относительно пяты сваи от начальной температуры суглинков и глин

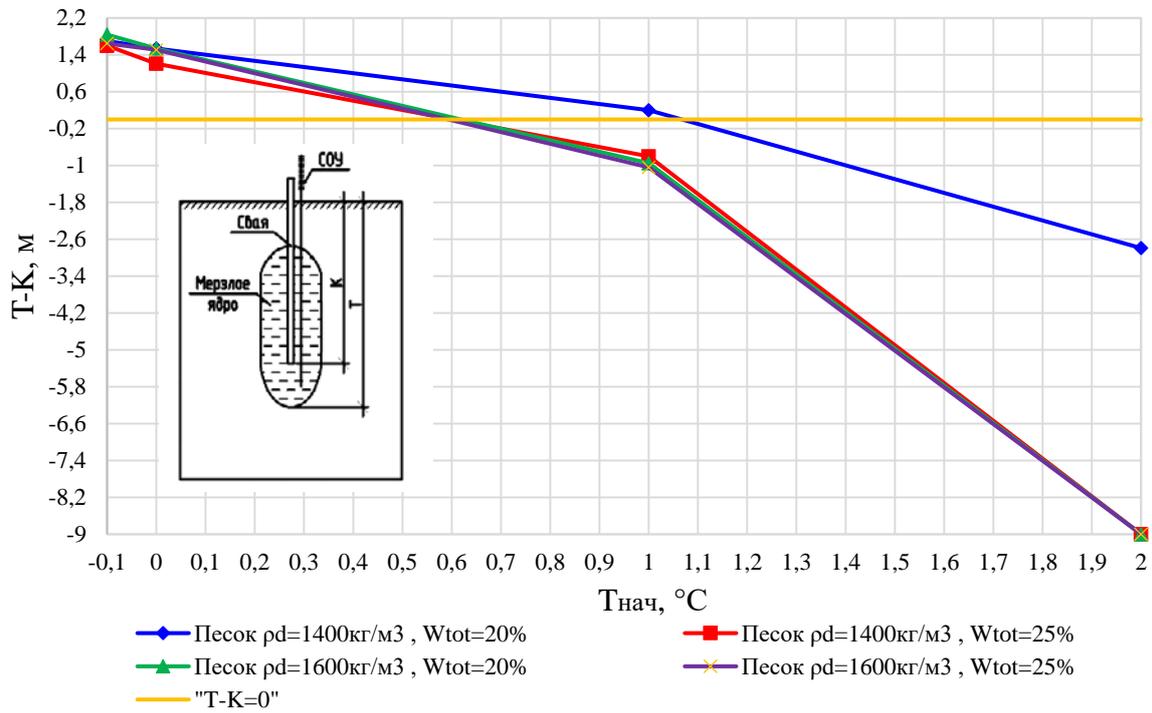


Рисунок 3.10. Изменение положения подошвы ядра относительно пяты сваи от начальной температуры песков

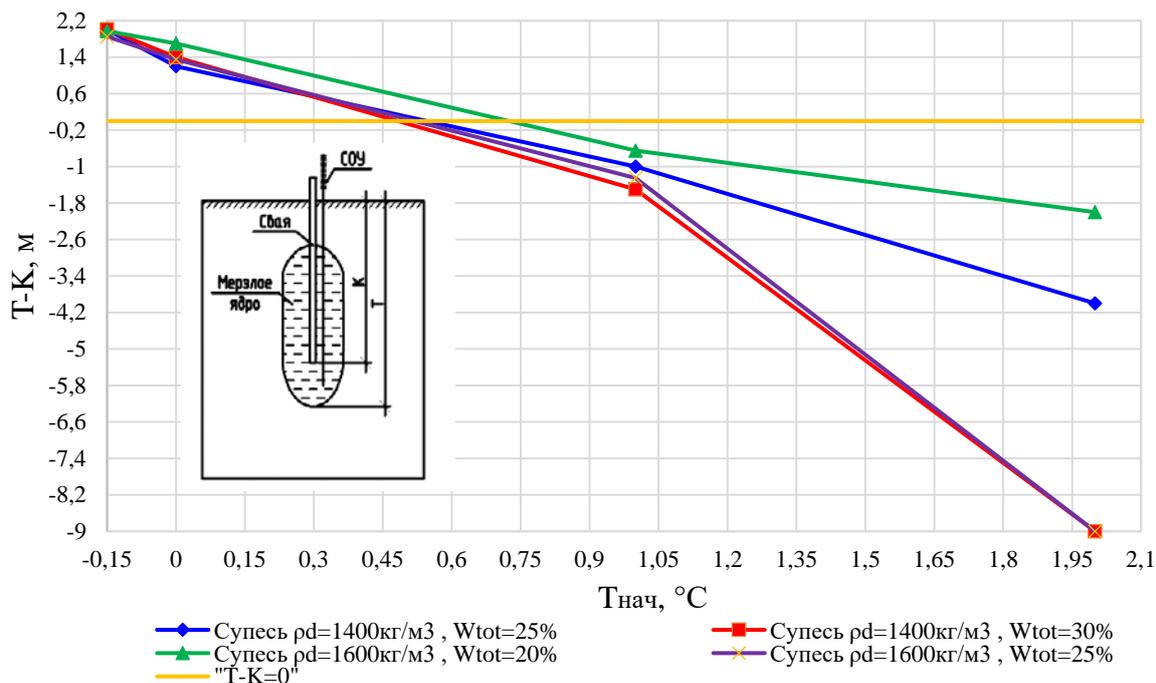


Рисунок 3.11. Изменение положения подошвы ядра относительно пяты сваи от начальной температуры супесей

По данным, представленным на графиках (рис. 3.9–3.11), возможно определить геометрическое положение подошвы ядра (вычислить разность величин $T-K$) относительно пяты сваи, погруженной на 9 м в термостабилизируемое основание.

В конце первого летнего периода (1 октября) сделаны следующие выводы по геометрическим размерам (диаметру, высоте, объему) ядра и геометрическому положению подошвы ядра относительно пяты сваи, погруженной на 9 м в термостабилизируемое основание, по результатам прогнозных температурных расчетов:

Диаметр ядра равен:

- от 1,35 до 2,14 м при начальной температуре грунтов $T_{нач} = -0,1; -0,15$ и $-0,2$ °C;
- от 1,05 до 1,80 м при начальной температуре грунтов $T_{нач} = 0$ °C;
- от 0,49 до 0,84 м при начальной температуре грунтов $T_{нач} = 1$ °C;
- от 0,00 до 0,49 м при начальной температуре грунтов $T_{нач} = 2$ °C.

Высота ядра равна:

- от 6,94 до 7,97 м при начальной температуре грунтов
 $T_{\text{нач}} = -0,1; -0,15 \text{ и } -0,2 \text{ } ^\circ\text{C};$
- от 6,49 до 7,66 м при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C};$
- от 3,40 до 5,93 м при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 1 \text{ } ^\circ\text{C};$
- от 0,00 до 3,60 м при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 2 \text{ } ^\circ\text{C}.$

Объем ядра равен:

- от 10,07 до 26,25 м³ при начальной температуре грунтов
 $T_{\text{нач}} = -0,1; -0,15 \text{ и } -0,2 \text{ } ^\circ\text{C};$
- от 5,62 до 19,03 м³ при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C};$
- от 0,74 до 2,65 м³ при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 1 \text{ } ^\circ\text{C};$
- от 0,00 до 0,47 м³ при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 2 \text{ } ^\circ\text{C}.$

Определено геометрическое положение подошвы ядра относительно пяты сваи, то есть вычислена разность величин Т-К. При начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = -0,1; -0,15; -0,2 \text{ и } 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ разность величин Т-К будет больше нуля, то есть пята сваи находится в ядре. При начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 1; 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ разность величин Т-К будет меньше нуля, то есть ядро не выходит за пределы пяты сваи.

Общий вид температурного поля грунтового основания с погруженной в него на 10 м сваей с термостабилизатором, длина испарительной части которого равна 11 м, представлен на рисунке 3.12.

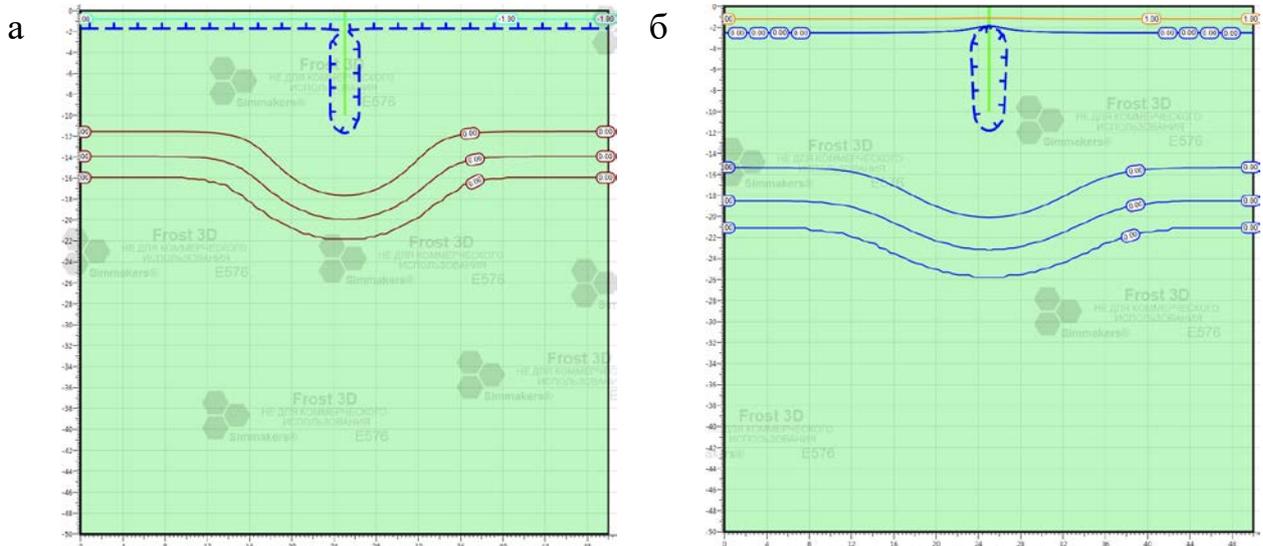


Рисунок 3.12. Температурные поля грунтового основания с погруженной в него на 10 м сваей с термостабилизатором, длина испарительной части которого равна 11 м: а) в конце зимнего периода (1 мая); б) в конце летнего периода (1 октября)

Графическая зависимость изменения диаметра ядра, формирующегося вокруг сваи, погруженной на 10 м в термостабилизируемое основание, от характеристик грунтов основания в конце первого летнего периода представлена на рисунках 3.13–3.15.

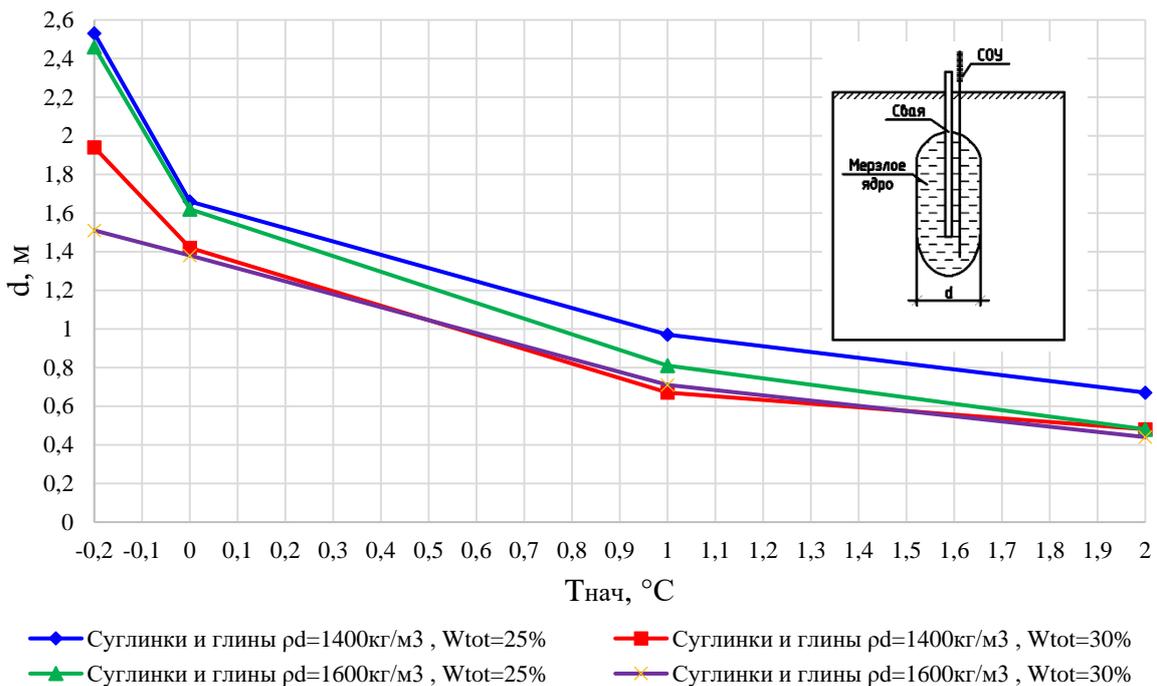


Рисунок 3.13. Изменение диаметра ядра от начальной температуры суглинков и глин

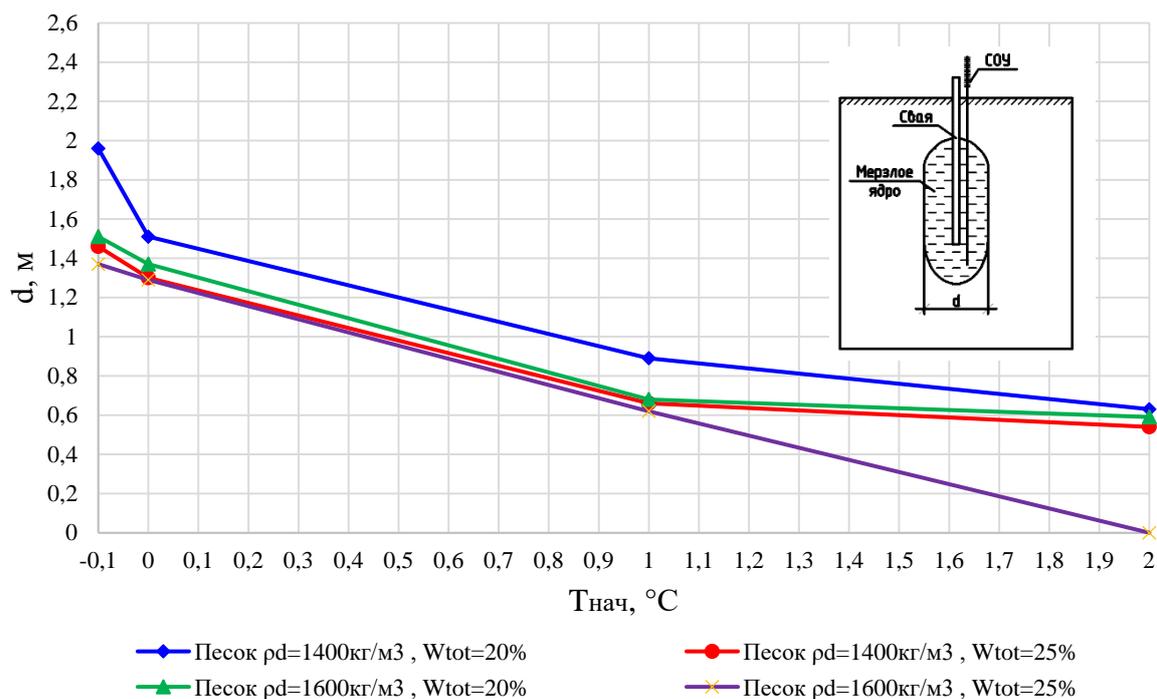


Рисунок 3.14. Изменение диаметра ядра от начальной температуры песков

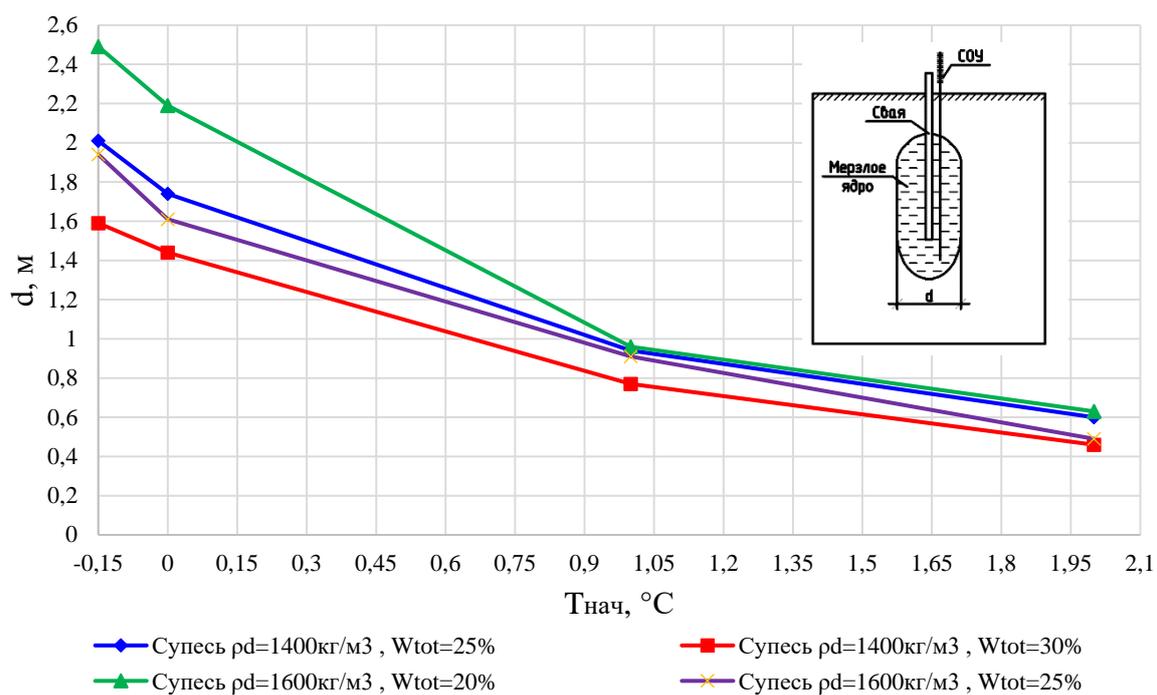


Рисунок 3.15. Изменение диаметра ядра от начальной температуры супесей

На основании графических данных (рис. 3.13–3.15) выявлено, что при монтаже СОУ у свай, погруженной на 10 м в термостабилизируемое основание, вокруг нее формируется ядро диаметром до 2,53 м в зависимости от начальной температуры и типа грунтов основания.

На графиках (рис. 3.16–3.18) отображена зависимость изменения высоты ядра, формирующегося вокруг сваи, погруженной на 10 м в термостабилизируемое основание, от характеристик грунтов основания в конце первого летнего периода.

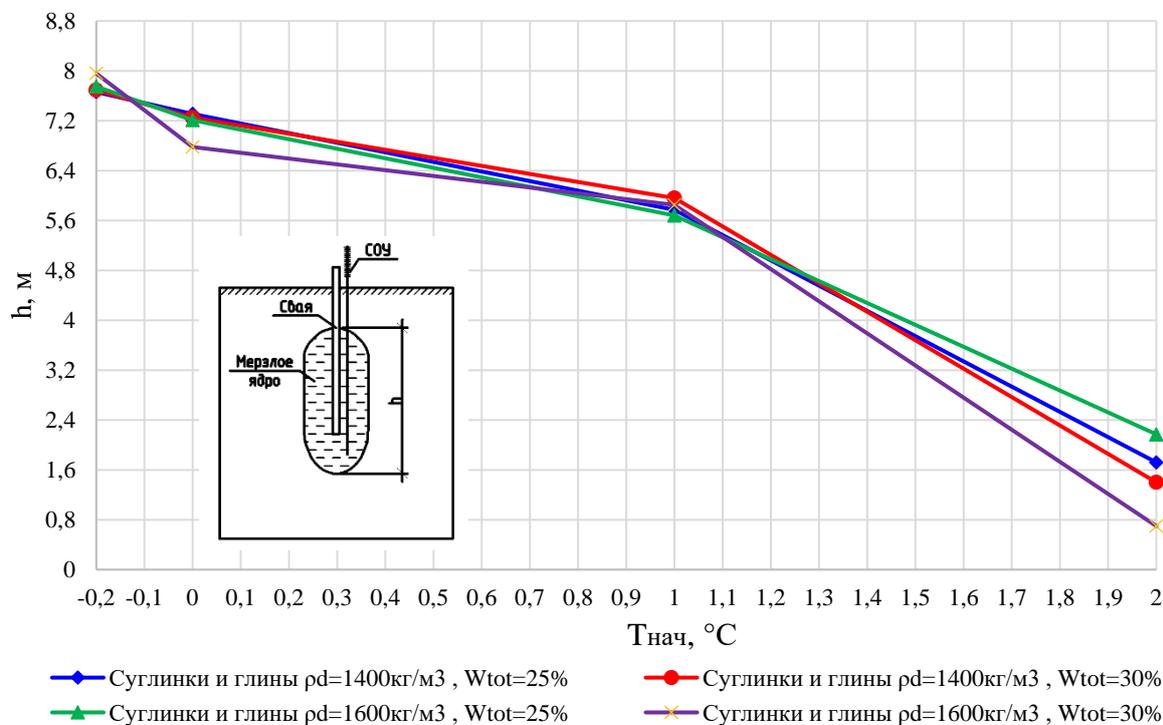


Рисунок 3.16. Изменение высоты ядра от начальной температуры суглинков и глин

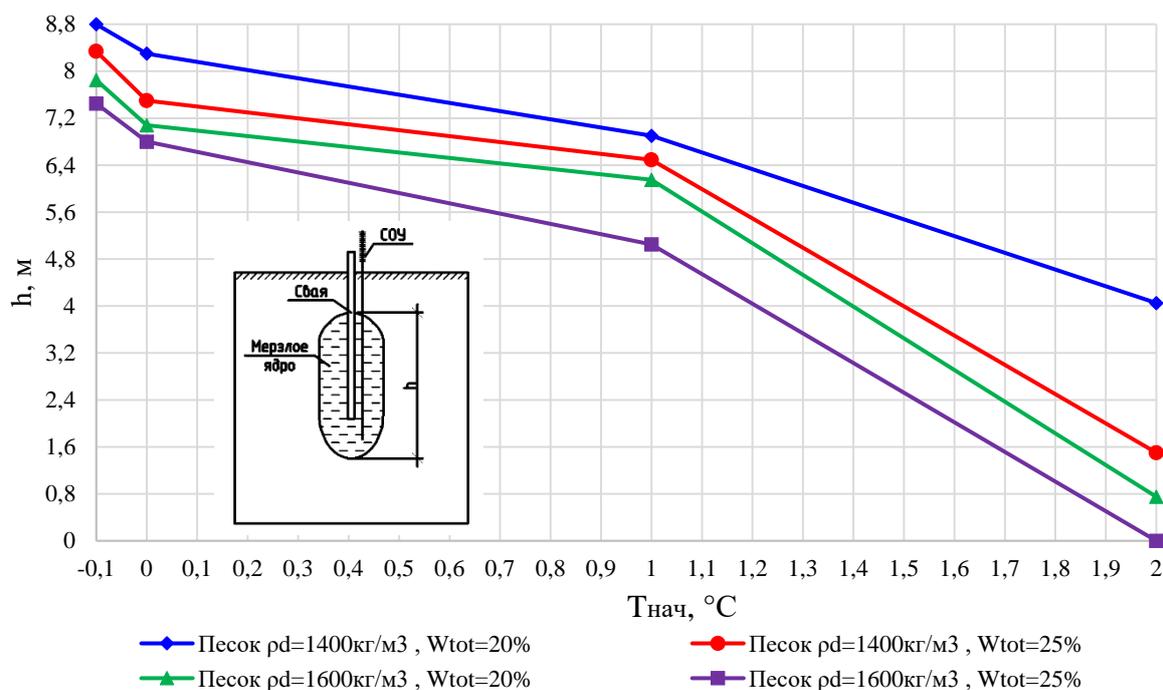


Рисунок 3.17. Изменение высоты ядра от начальной температуры песков

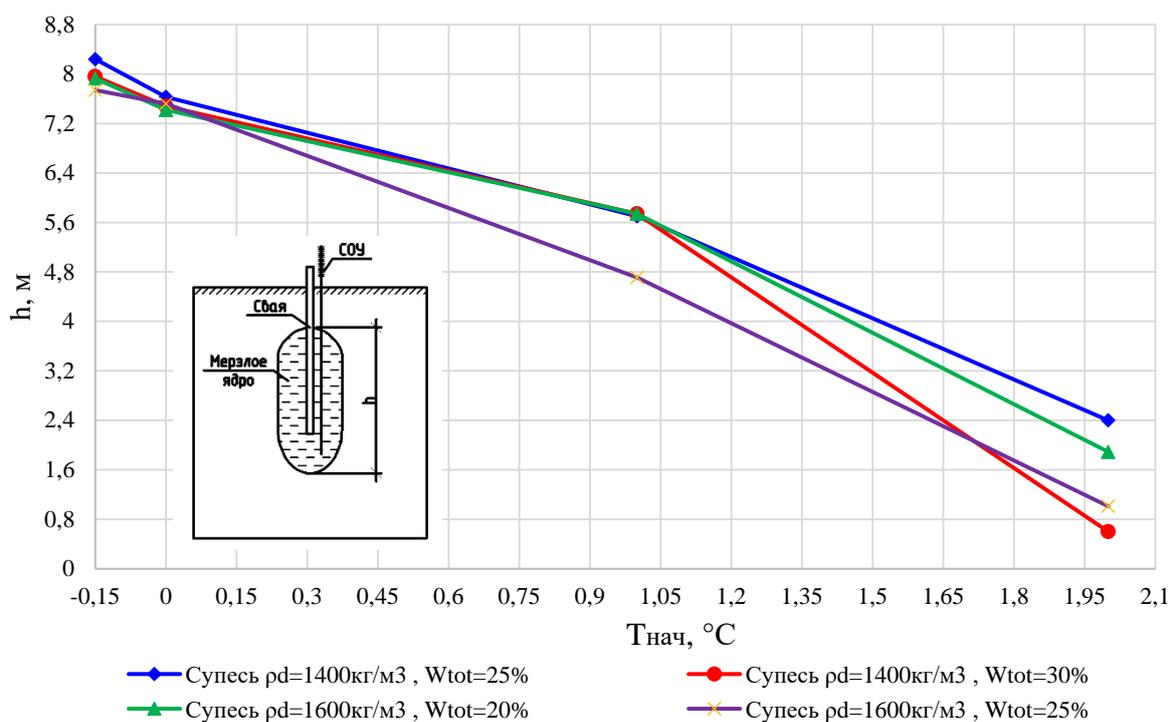


Рисунок 3.18. Изменение высоты ядра от начальной температуры супесей

По графикам (рис. 3.16–3.18) установлено, что при монтаже СОУ у сваи, погруженной на 10 м в термостабилизируемое основание, вокруг нее формируется ядро высотой до 8,8 м в зависимости от начальной температуры и типа грунтов основания.

Другим важным параметром является геометрическое положение подошвы ядра относительно пяты сваи. Графическая зависимость изменения положения подошвы ядра относительно пяты сваи, погруженной на 10 м в термостабилизируемое основание, представлена на рисунках 3.19–3.21. Оранжевая линия «Т-К=0» – это положение, когда подошва ядра и пята сваи находятся в одном уровне.

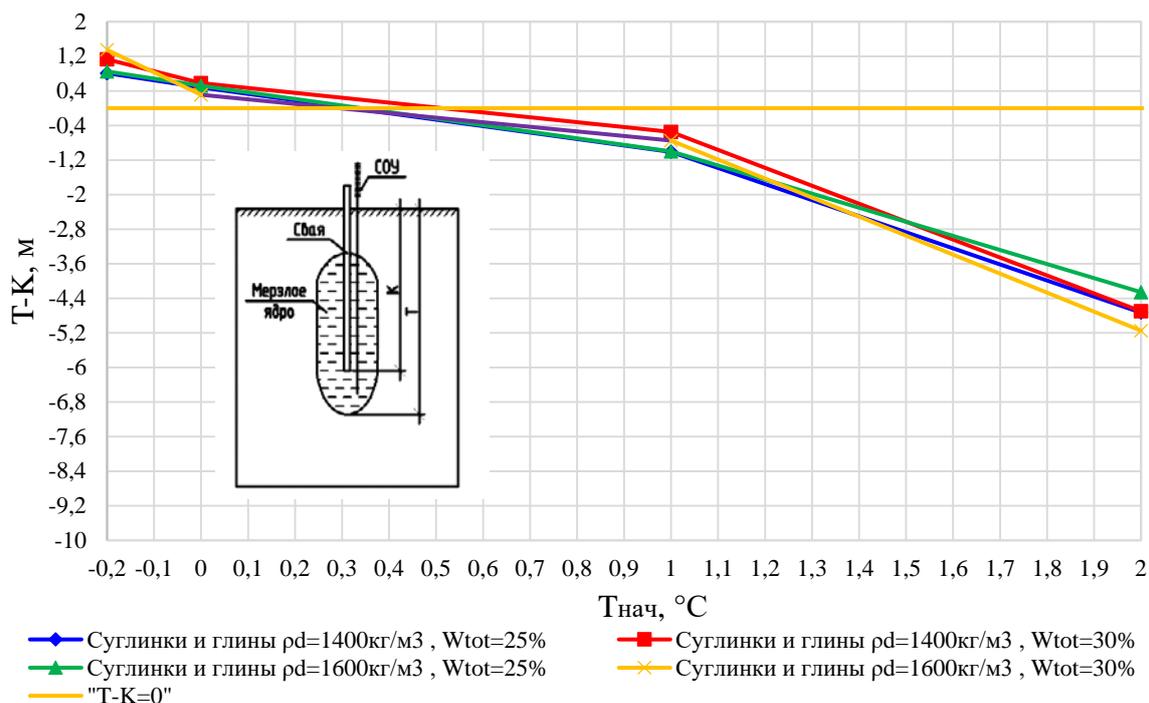


Рисунок 3.19. Изменение положения подошвы ядра относительно пяты сваи от начальной температуры суглинков и глин

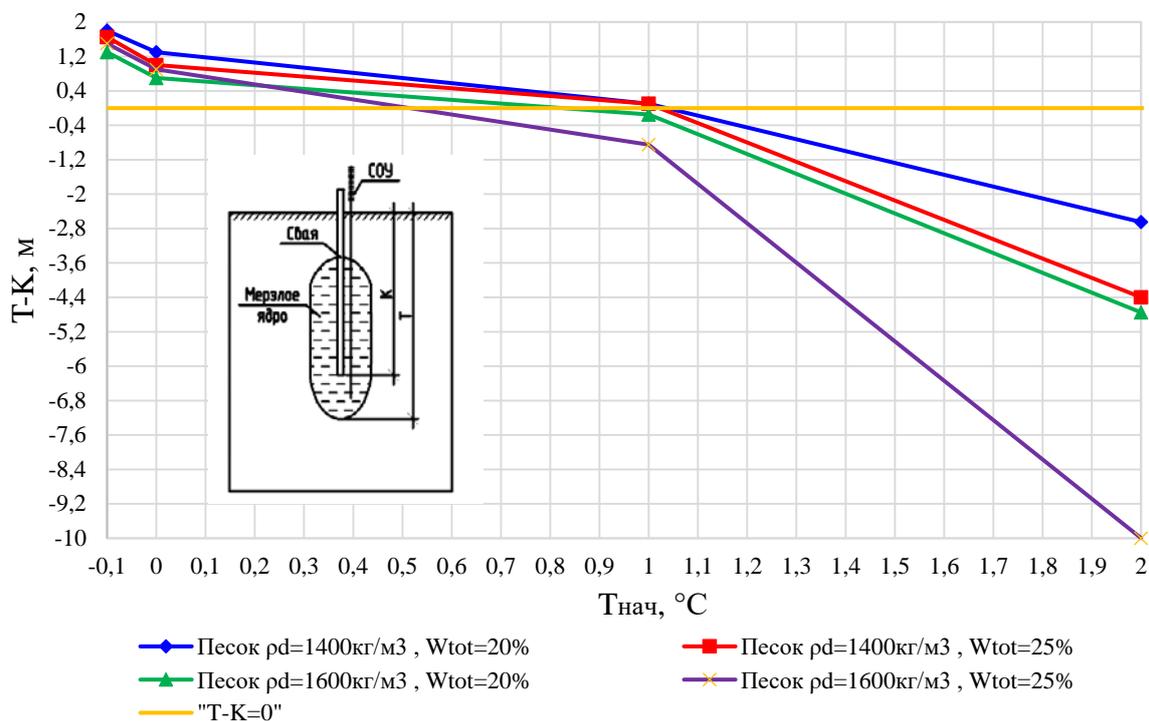


Рисунок 3.20. Изменение положения подошвы ядра относительно пяты сваи от начальной температуры песков

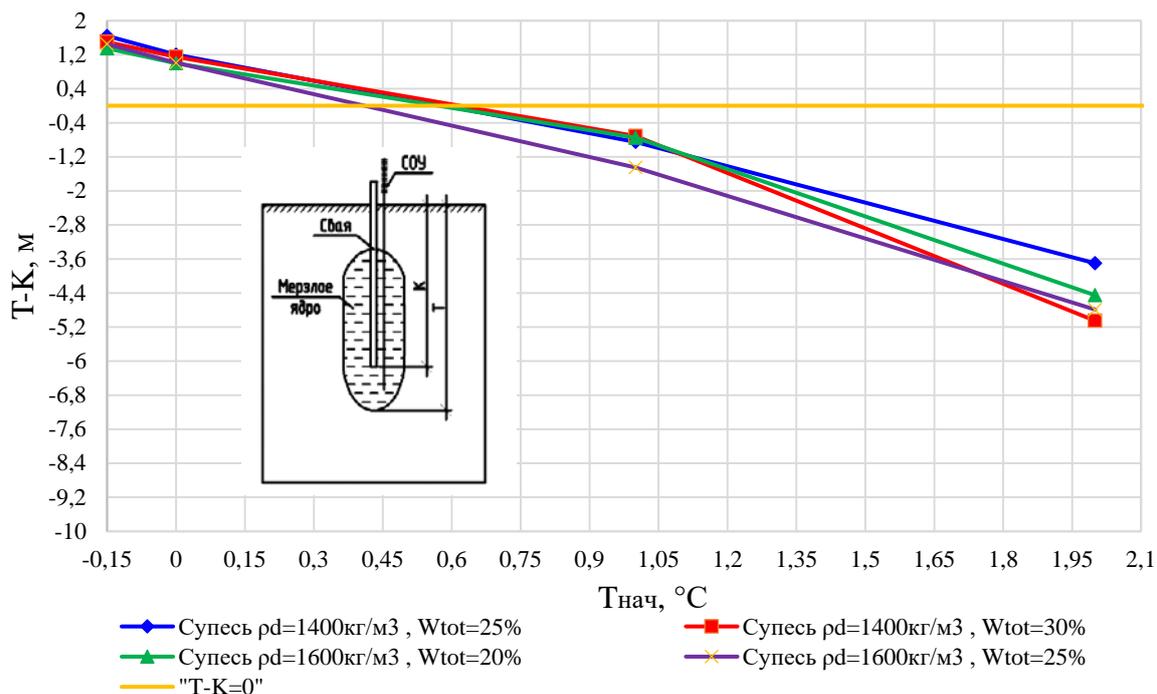


Рисунок 3.21. Изменение положения подошвы ядра относительно пяты сваи от начальной температуры супесей

По данным, представленным на графиках (рис. 3.19–3.21), возможно определить геометрическое положение подошвы ядра (вычислить разность величин $T-K$) относительно пяты сваи, погруженной на 10 м в термостабилизируемое основание.

В конце первого летнего периода (1 октября) сделаны следующие выводы по геометрическим размерам (диаметру, высоте, объему) ядра и геометрическому положению подошвы ядра относительно пяты сваи, погруженной на 10 м в термостабилизируемое основание, по результатам прогнозных температурных расчетов:

Диаметр ядра равен:

- от 1,37 до 2,53 м при начальной температуре грунтов $T_{нач} = -0,1; -0,15$ и $-0,2$ °С;
- от 1,29 до 2,19 м при начальной температуре грунтов $T_{нач} = 0$ °С;
- от 0,62 до 0,97 м при начальной температуре грунтов $T_{нач} = 1$ °С;
- от 0,00 до 0,67 м при начальной температуре грунтов $T_{нач} = 2$ °С.

Высота ядра равна:

- от 7,45 до 8,80 м при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = -0,1; -0,15$ и $-0,2$ °С;
- от 6,80 до 8,30 м при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 0$ °С;
- от 4,71 до 6,90 м при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 1$ °С;
- от 0,00 до 4,05 м при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 2$ °С.

Объем ядра равен:

- от 10,98 до 38,61 м³ при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = -0,1; -0,15$ и $-0,2$ °С;
- от 8,88 до 27,95 м³ при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 0$ °С;
- от 1,52 до 4,29 м³ при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 1$ °С;
- от 0,00 до 1,26 м³ при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 2$ °С.

Определено геометрическое положение подошвы ядра относительно пяты сваи, то есть вычислена разность величин Т-К. При начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = -0,1; -0,15; -0,2$ и 0 °С разность величин Т-К будет больше нуля, то есть пята сваи находится в ядре. При начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 1; 2$ °С разность величин Т-К будет меньше нуля, то есть ядро не выходит за пределы пяты сваи.

Общий вид температурного поля грунтового основания с погруженной в него на 11 м сваей с термостабилизатором, длина испарительной части которого равна 12 м, представлен на рисунке 3.22.

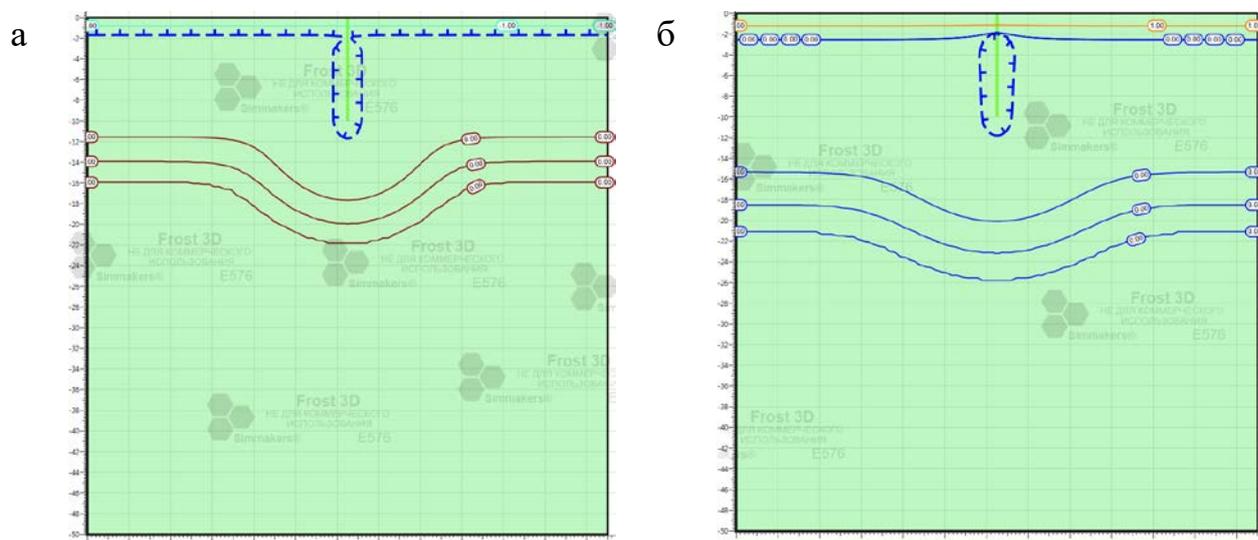


Рисунок 3.22. Температурные поля грунтового основания с погруженной в него на 11 м сваей с термостабилизатором, длина испарительной части которого равна 12 м: а) в конце зимнего периода (1 мая); б) в конце летнего периода (1 октября)

Графическая зависимость изменения диаметра ядра, формирующегося вокруг сваи, погруженной на 11 м в термостабилизируемое основание, от характеристик грунтов основания в конце первого летнего периода представлена на рисунках 3.23–3.25.

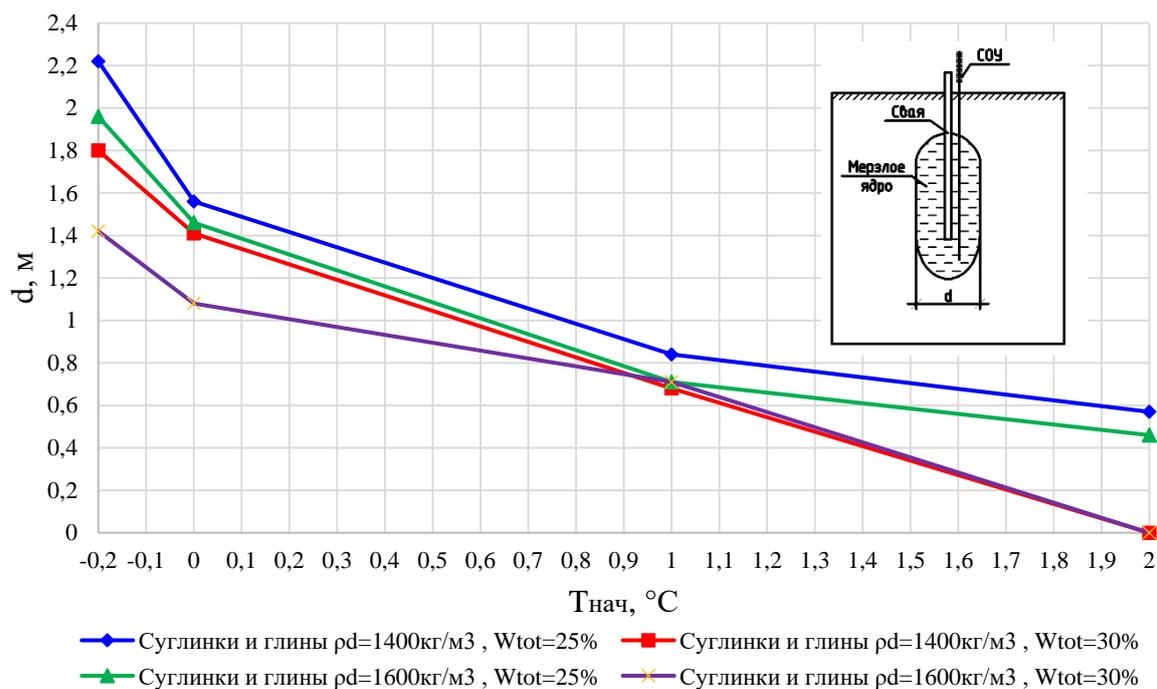


Рисунок 3.23. Изменение диаметра ядра от начальной температуры суглинков и глин

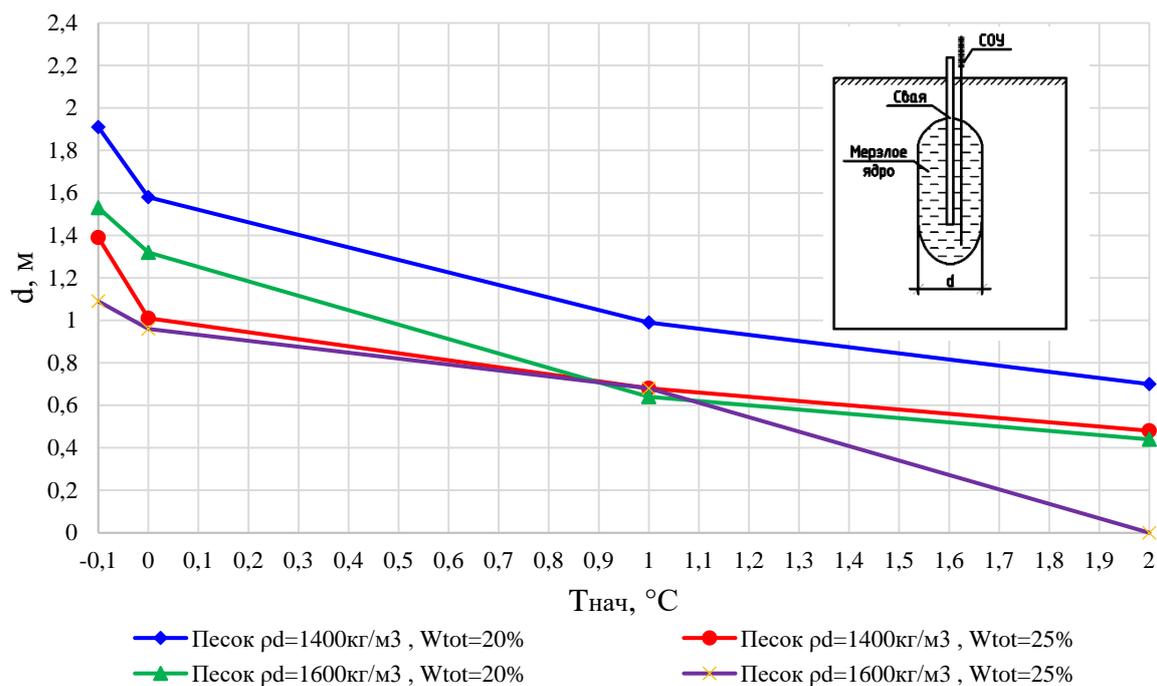


Рисунок 3.24. Изменение диаметра ядра от начальной температуры песков

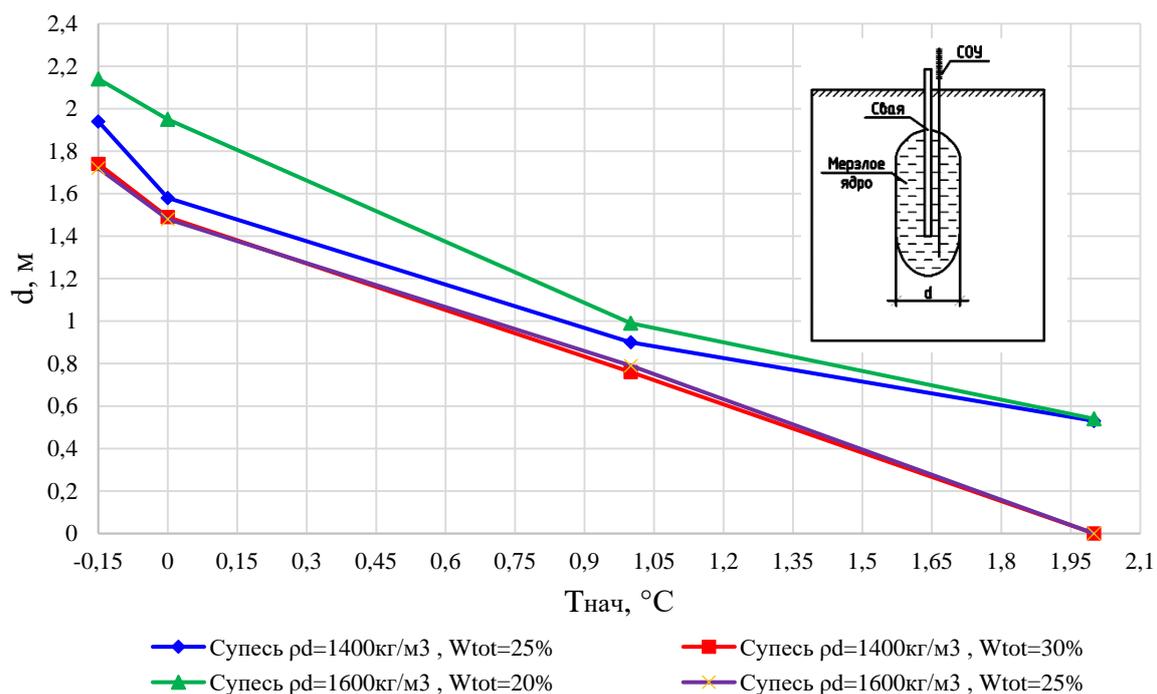


Рисунок 3.25. Изменение диаметра ядра от начальной температуры супесей

На основании графических данных (рис. 3.23–3.25) выявлено, что при монтаже СОУ у свай, погруженной на 11 м в термостабилизируемое основание, вокруг нее формируется ядро диаметром до 2,22 м в зависимости от начальной температуры и типа грунтов основания.

На графиках (рис. 3.26–3.28) отображена зависимость изменения высоты ядра, формирующегося вокруг сваи, погруженной на 11 м в термостабилизируемое основание, от характеристик грунтов основания в конце первого летнего периода.

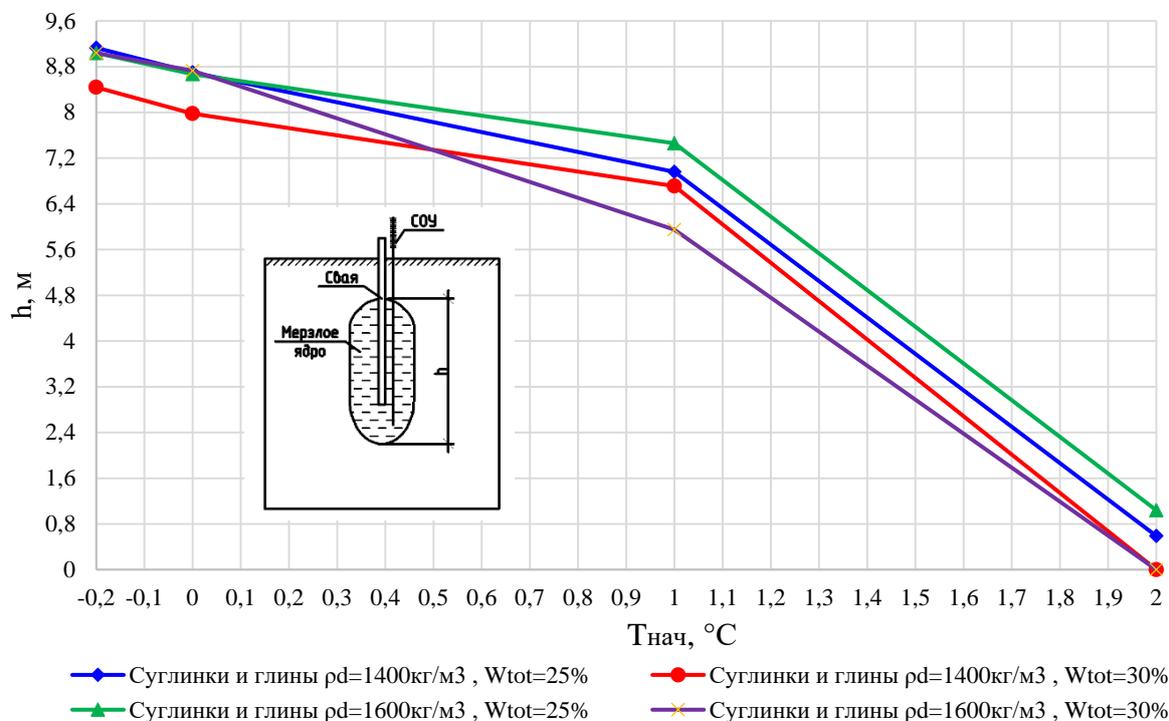


Рисунок 3.26. Изменение высоты ядра от начальной температуры суглинков и глин

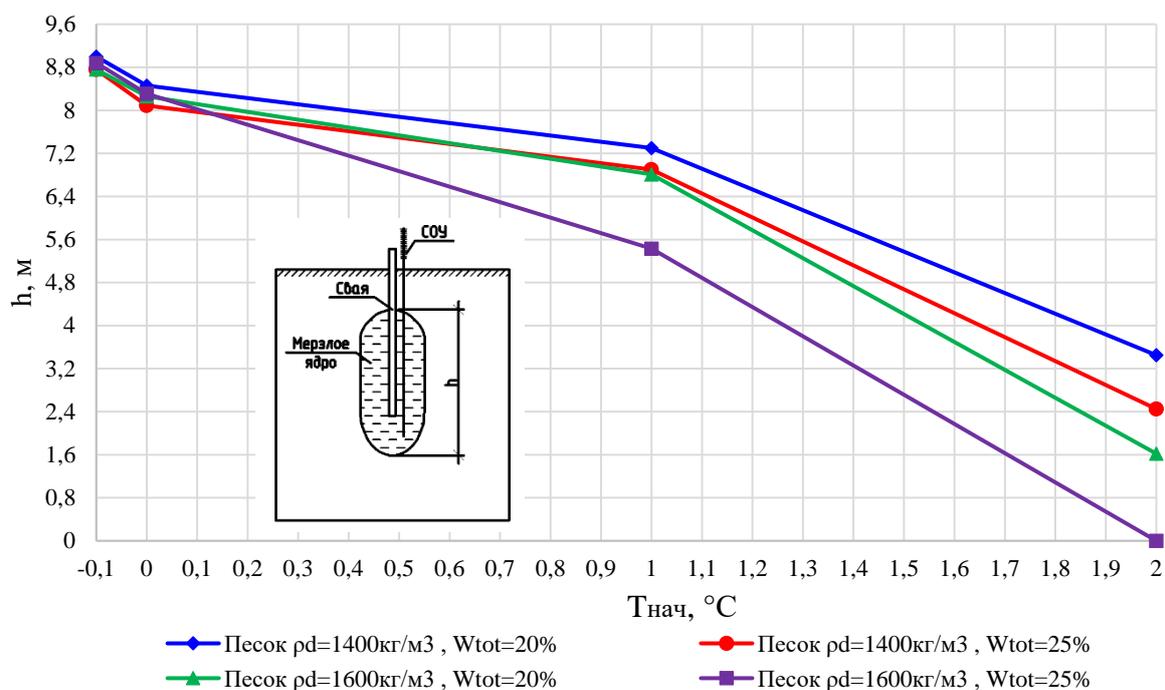


Рисунок 3.27. Изменение высоты ядра от начальной температуры песков

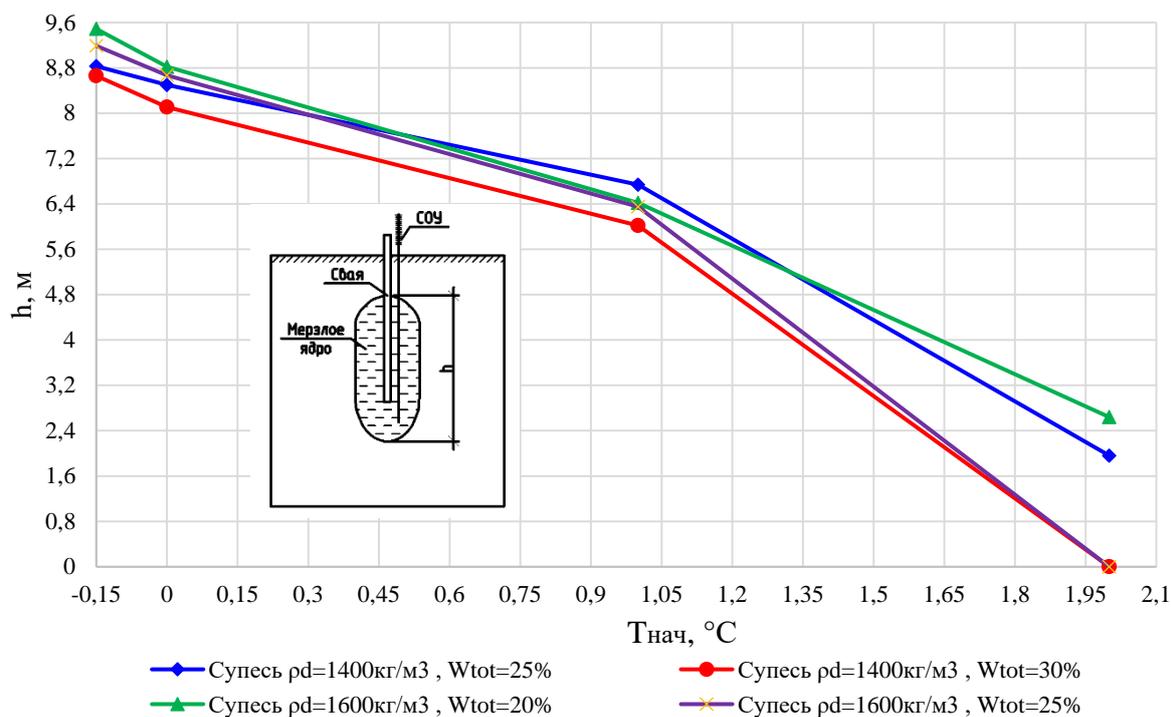


Рисунок 3.28. Изменение высоты ядра от начальной температуры супесей

По графикам (рис. 3.26–3.28) установлено, что при монтаже СОУ у сваи, погруженной на 11 м в термостабилизируемое основание, вокруг нее формируется ядро высотой до 9,49 м в зависимости от начальной температуры и типа грунтов основания.

Другим важным параметром является геометрическое положение подошвы ядра относительно пяты сваи. Графическая зависимость изменения положения подошвы ядра относительно пяты сваи, погруженной на 11 м в термостабилизируемое основание, представлена на рисунках 3.29–3.31. Оранжевая линия «Т-К=0» – это положение, когда подошва ядра и пята сваи находятся в одном уровне.

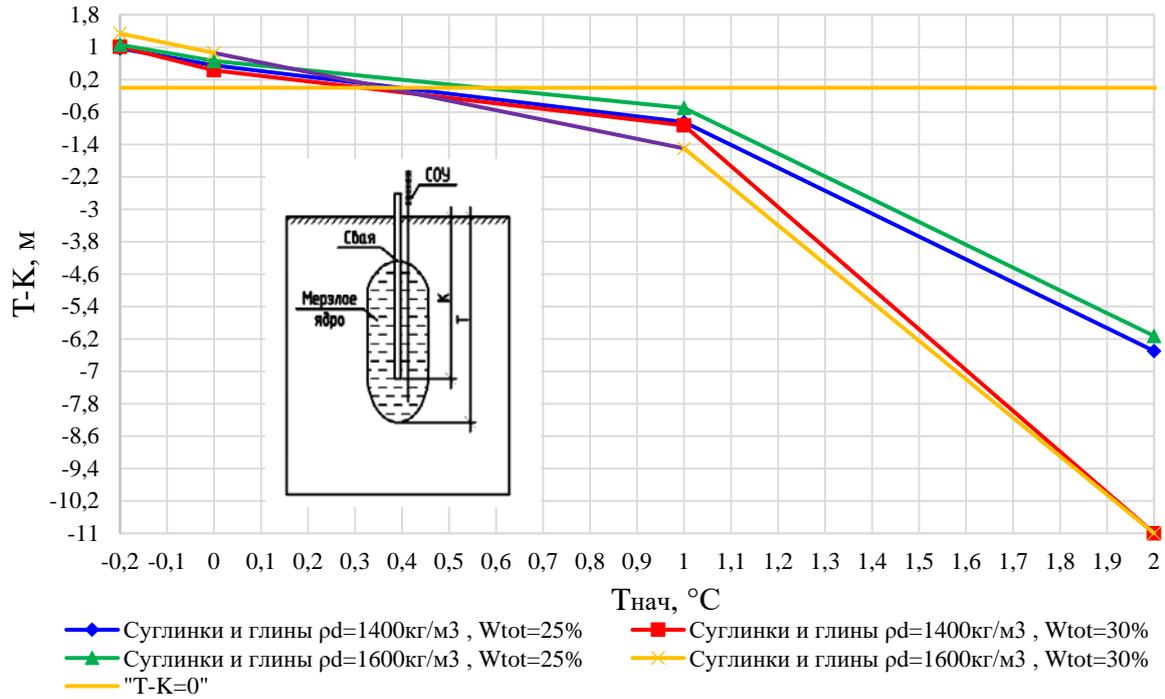


Рисунок 3.29. Изменение положения подошвы ядра относительно пяты сваи от начальной температуры суглинков и глин

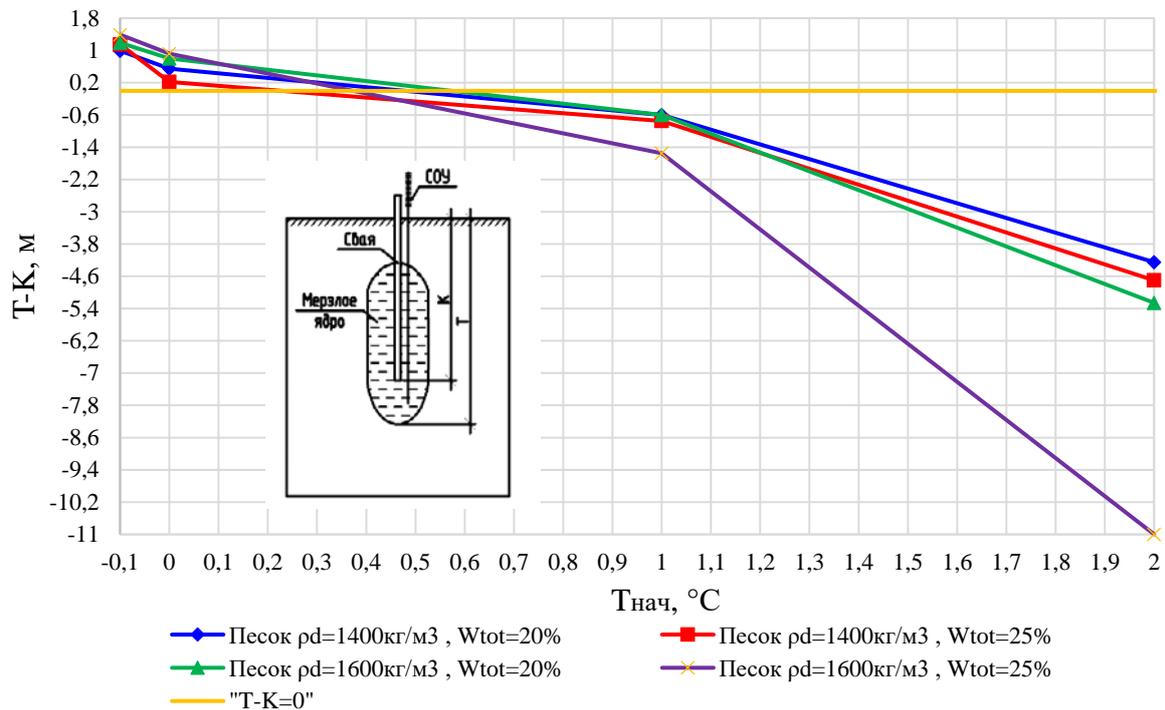


Рисунок 3.30. Изменение положения подошвы ядра относительно пяты сваи от начальной температуры песков

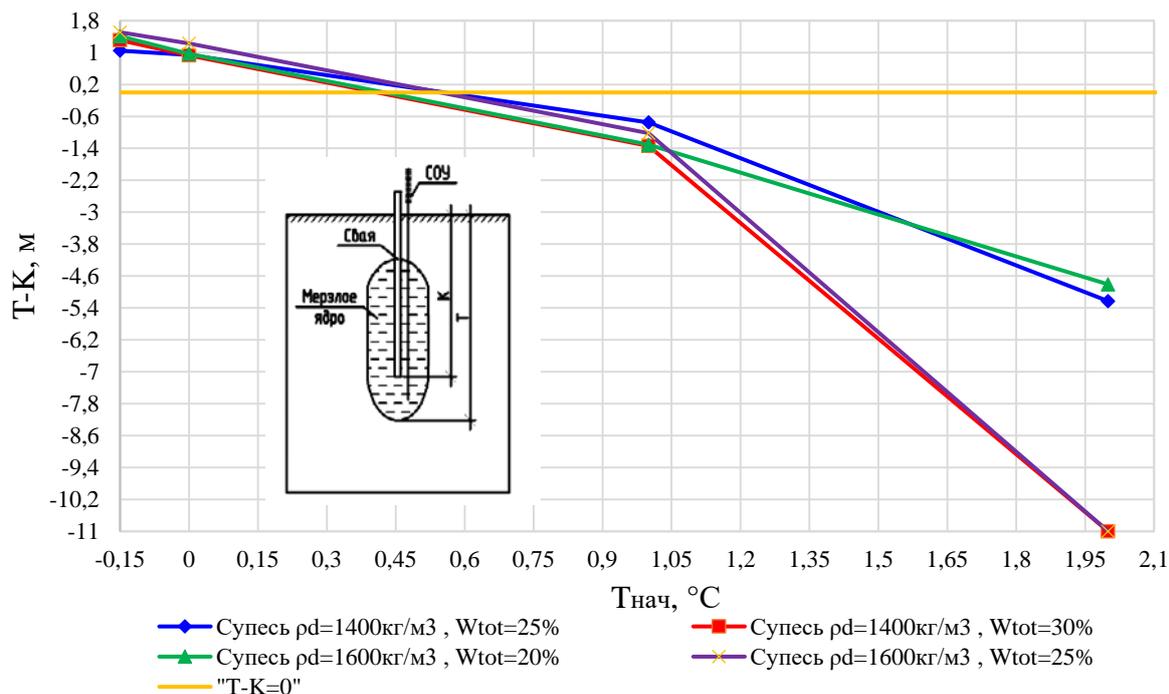


Рисунок 3.31. Изменение положения подошвы ядра относительно пяты сваи от начальной температуры супесей

По данным, представленным на графиках (рис. 3.29–3.31), возможно определить геометрическое положение подошвы ядра (вычислить разность величин $T-K$) относительно пяты сваи, погруженной на 11 м в термостабилизируемое основание.

В конце первого летнего периода (1 октября) сделаны следующие выводы по геометрическим размерам (диаметру, высоте, объему) ядра и геометрическому положению подошвы ядра относительно пяты сваи, погруженной на 11 м в термостабилизируемое основание, по результатам прогнозных температурных расчетов:

Диаметр ядра равен:

- от 1,09 до 2,22 м при начальной температуре грунтов $T_{нач} = -0,1; -0,15$ и $-0,2$ $^\circ C$;
- от 0,96 до 1,95 м при начальной температуре грунтов $T_{нач} = 0$ $^\circ C$;
- от 0,64 до 0,99 м при начальной температуре грунтов $T_{нач} = 1$ $^\circ C$;
- от 0,00 до 0,70 м при начальной температуре грунтов $T_{нач} = 2$ $^\circ C$.

Высота ядра равна:

- от 8,44 до 9,49 м при начальной температуре грунтов
 $T_{\text{нач}} = -0,1; -0,15 \text{ и } -0,2 \text{ } ^\circ\text{C};$
- от 7,98 до 8,82 м при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C};$
- от 5,43 до 7,46 м при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 1 \text{ } ^\circ\text{C};$
- от 0,00 до 3,45 м при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 2 \text{ } ^\circ\text{C}.$

Объем ядра равен:

- от 8,28 до 35,34 м³ при начальной температуре грунтов
 $T_{\text{нач}} = -0,1; -0,15 \text{ и } -0,2 \text{ } ^\circ\text{C};$
- от 6,01 до 26,34 м³ при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C};$
- от 1,97 до 5,61 м³ при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 1 \text{ } ^\circ\text{C};$
- от 0,00 до 1,32 м³ при начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 2 \text{ } ^\circ\text{C}.$

Определено геометрическое положение подошвы ядра относительно пяты сваи, то есть вычислена разность величин Т-К. При начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = -0,1; -0,15; -0,2 \text{ и } 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ разность величин Т-К будет больше нуля, то есть пята сваи находится в ядре. При начальной температуре грунтов $T_{\text{нач}} = 1; 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ разность величин Т-К будет меньше нуля, то есть ядро не выходит за пределы пяты сваи.

В ходе исследования были проанализированы результаты численных расчетов 144 вариантов термостабилизируемого основания, сложенного разного типа грунтами, отличающимися плотностью, влажностью и начальной температурой, с погруженной в него на разную глубину сваей с термостабилизатором соответствующей длины. Температурные расчеты проведены по климатическим данным ближайшей метеостанции г. Лабытнанги (ЯНАО). На основе проведенных экспериментально-теоретических исследований определены основные геометрические размеры (диаметр, высота, объем) и геометрическое положение подошвы ядра (ниже, на одном уровне или выше пяты сваи), формируемого вокруг свай различной длины. Установлено, что геометрические параметры ядра зависят от климатических и грунтовых условий площадки строительства, а также от конструктивных параметров СОУ.

Выявлено, что при увеличении длины СОУ высота ядра также увеличивается, однако диаметр ядра при увеличении длины СОУ остается в диапазоне, равном до 2,53 м. Геометрические параметры ядра, определенные в данном параграфе, являются ключевыми исходными данными для определения осадки сваи в термостабилизируемом основании.

3.3. Методика определения осадки сваи

Осадку сваи от действия внешней нагрузки $S = f(F)$ вычислим с учетом теории Далматова Б.И. и Лапшина Ф.К., так как схема работы сваи со сформированным ядром принципиально не отличается от схемы работы висячей сваи. В основу теории заложено предположение раздельной работы сваи по пяте и боковой поверхности. Приложенная внешняя нагрузка на сваю со сформированным ядром распределяется между подошвой и боковой поверхностью. Сопротивление грунта выше ядра не учитывается, так как эта зона частично находится в деятельном слое. Проанализируем первый участок нагружения сваи (рис. 3.32), на котором грунт рассматривается упругим. Внешняя нагрузка воспринимается и лобовой, и боковой поверхностями. Этот участок графика «нагрузки – осадки» будем называть линейным, его завершение характеризуется точкой (F_1, S_1) . Нагрузка F_1 состоит из двух составляющих:

$$F_1 = F_6 + F_{л1}, \quad (3.1)$$

где F_6 – нагрузка, действующая по боковой поверхности сваи, МН;

$F_{л1}$ – нагрузка, действующая на лобовой поверхности сваи при потере несущей способности по боковой поверхности, МН.

С ростом нагрузки F ($F > F_1$) на графике «нагрузки – осадки» выделен второй участок (рис. 3.32), на котором включается в работу только пята сваи. В этом случае работа сваи эквивалентна действию штампа на грунтовое основание. Осадка сваи ($S = f(F)$) на графике «нагрузки – осадки» имеет нелинейную зависимость. В диссертации для описания графика «осадки – нагрузки» на этом участке использована широко апробированная методика Малышева М.В. и Никитиной Н.С., основанная на геометрической нелинейности. Нагрузка F_2 , при

которой свая теряет несущую способность, определяется по следующей формуле:

$$F_2 = F_1 + (F_{л2} - F_{л1}), \quad (3.2)$$

$F_1, F_{л1}$ – то же, что и в формуле 3.1, МН;

$F_{л2}$ – часть внешней нагрузки, передаваемой пятой сваи на грунт основания, равная потере ее несущей способности по грунту, МН.

Значение нагрузки F , находящейся в диапазоне нелинейной зависимости $S = f(F)$, равна ($F_1 < F < F_2$):

$$F = F_1 + \Delta F, \quad (3.3)$$

где F_1 – то же, что и в формуле 3.1, МН;

ΔF – приращение нагрузки на сваю с момента окончания линейной зависимости $S = f(F)$, МН.

Общая осадка сваи S суммируется из осадок S_1 и S_2 каждого участка:

$$S = S_1 + S_2, \quad (3.4)$$

где S_1 – осадка сваи на первом участке (рис. 3.32), мм;

S_2 – осадка сваи на втором участке (рис. 3.32), мм.

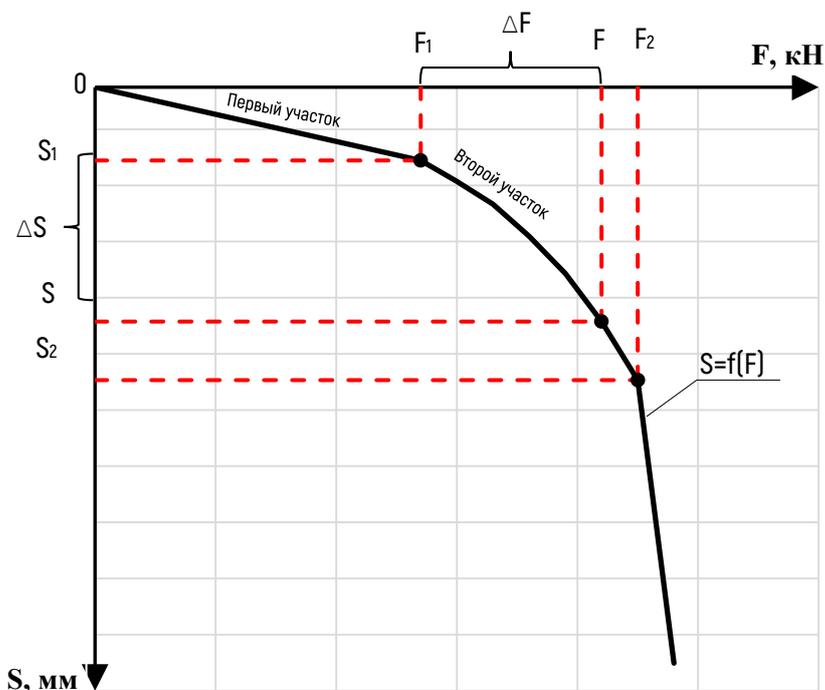


Рисунок 3.32. Осадка сваи S от нагрузки F

3.3.1. Применение метода В.З. Власова к расчету упругого полупространства

Рассмотрим решение плоской задачи о приложении внешней нагрузки, которая не зависит от координаты y (рис. 3.33), к дневной поверхности полупространства по методу В.З. Власова [49]. Вместо полупространства рассмотрим сжимаемый слой высотой H и выделим из него пластинку толщиной $\delta = 1$ м (рис. 3.33), чтобы рассматривать плоскую задачу (случай плоской деформации).

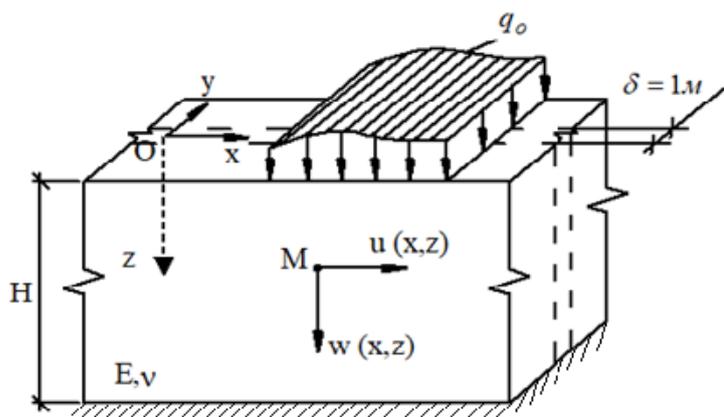


Рисунок 3.33. Сжимаемый слой упругой модели грунта

Задача решается в перемещениях. Искомыми являются горизонтальные $u(x, z)$ и вертикальные $w(x, z)$ перемещения, которые представлены в виде произведения двух функций, каждая из которых является функцией одной переменной:

$$\begin{cases} u(x, z) = U(x) \cdot \varphi(z), \\ w(x, z) = W(x) \cdot \psi(z). \end{cases} \quad (3.5)$$

Функции $U(x)$ и $W(x)$ являются неизвестными, а функции $\varphi(z)$ и $\psi(z)$ – задаются и являются нормированными.

Согласно методу В.З. Власова, предположим, что горизонтальные перемещения $u(x, z)$ малы по сравнению с вертикальными, которыми можно пренебречь. Малость горизонтальных перемещений обусловлена действием внешней нагрузки в вертикальном направлении. Следовательно, выражения для перемещений принимают следующий вид:

$$\begin{cases} u(x, z) \approx 0, \\ w(x, z) = W(x) \cdot \psi(z). \end{cases} \quad (3.6)$$

Нормированная функция $\psi(z)$ удовлетворяет условиям (рис. 3.39):

$$\psi(z = 0) = 1; \psi(z = H) = 0.$$

Для точек сжимаемого упругого слоя грунта применим обобщенный закон Гука и уравнения Коши:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \left(\varepsilon_x + \frac{\nu}{1-\nu} \varepsilon_z \right), \\ \sigma_z = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \left(\varepsilon_z + \frac{\nu}{1-\nu} \varepsilon_x \right), \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xz}. \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}; \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}. \quad (3.8)$$

Заданным перемещениям в упругом основании (3.6), с учетом уравнений Коши (3.8), соответствуют следующие деформации:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = 0, \\ \varepsilon_z = W(x) \cdot \psi'(z), \\ \gamma_{xz} = W'(x) \cdot \psi(z), \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (W(x) \cdot \psi(z)) = W(x) \cdot \psi'(z),$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_z$ – линейные деформации вдоль осей OX и OZ,

γ_{xz} – сдвиговая деформация.

Напряжения, с учетом формул (3.9), примут следующий вид:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E \cdot \nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \cdot W(x) \cdot \psi'(z), \\ \sigma_z = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} W(x) \cdot \psi'(z), \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} = \frac{E}{2(1+\nu)} W'(x) \cdot \psi(z). \end{cases} \quad (3.10)$$

Для замыкания системы уравнений (3.9, 3.10) дополним ее уравнением равновесия для элемента, представленного на рисунке 3.34, в виде равенства работ внешних и внутренних сил на возможных перемещениях (принцип Лагранжа).

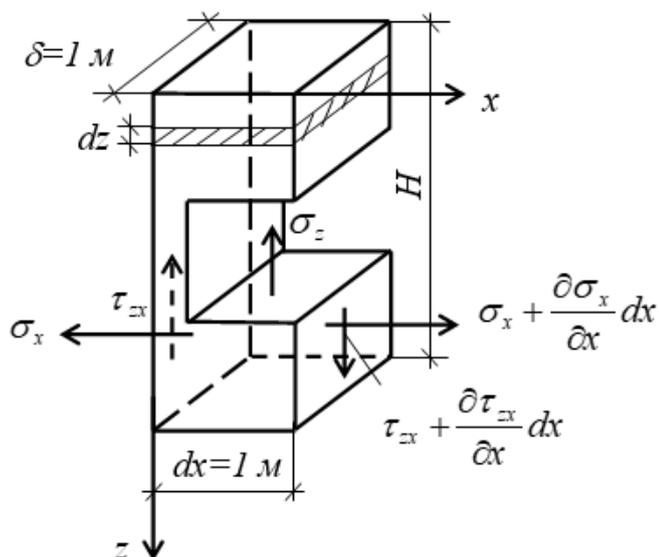


Рисунок 3.34. Напряжения в пределах элементарной полоски

Характер изменения возможных перемещений $\delta w(x, z)$ вдоль глубины сжимаемого слоя определяет нормированная размерная функция $\psi(z)$, м, множитель $W(x)$ является масштабным коэффициентом (вдоль оси Z не изменяется).

Внешние силы $\tau_{zx} \cdot dA$ и $\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} dx\right) \cdot dA$ по отношению к рассматриваемому элементу (рис. 3.34) и поверхностная нагрузка $q(x)$ участвуют в работе внешних сил.

Внутренняя сила равна $\sigma_z \cdot A$, где $A = \delta \cdot dx = 1 \text{ м}^2$, $dx = 1 \text{ м}$, $\delta = 1 \text{ м}$.

Работа внешней нагрузки $q(x, z = 0)$ без учета массовых сил примет следующий вид:

$$q(x, z) \cdot \delta w = q(x) \cdot \psi(z = 0) = q(x), \quad \psi(z = 0) = 1, \quad (3.11)$$

где $q(x)$ – нормальная поверхностная сила, $\psi(0)$ – значение функции $\psi(z)$ при $z = 0$.

Для внешней силы $\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} dx \cdot dA = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} dz$ возможным является вертикальное перемещение $\Delta_z = \gamma_{xz} \cdot dx$ (рис. 3.35, а). Внутренняя сила $\sigma_z \cdot dA = \sigma_z \cdot 1 \cdot 1$ имеет вертикальное перемещение $\Delta(dz) = \varepsilon_z \cdot dz$ (рис. 3.35, б).

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial W(x) \cdot \psi(z)}{\partial x} = \psi(z) \frac{\partial W(x)}{\partial x} = \psi(z) \cdot W'(x),$$

$$\Delta_z = \gamma_{xz} \cdot (dx = 1 \text{ м}) = \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0 + \psi(z) = \psi(z) \cdot 1 \text{ м, при } W'(x) = 1 \quad (3.12)$$

$$\Delta(dz) = \varepsilon_z \cdot dz = \frac{\partial w}{\partial z} dz = \psi'(z) \cdot dz. \quad (3.13)$$

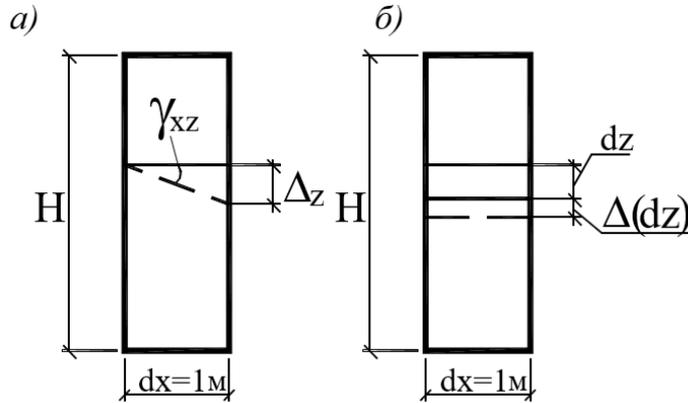


Рисунок 3.35. Линейная и угловая деформации в сжимаемом слое грунта

Работы внешних и внутренних сил имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} \cdot dz \cdot \psi(z); \quad \sigma_z \cdot 1 \cdot 1 \cdot \psi'(z) \cdot dz. \quad (3.14)$$

Суммируя работы в пределах высоты сжимаемого слоя H по принципу Лагранжа, приведем уравнение равновесия для слоя грунта:

$$\int_0^H \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} \cdot \psi(z) \cdot dz - \int_0^H \sigma_z \cdot \psi'(z) \cdot A \cdot dz + q(x) = 0, \quad (3.15)$$

здесь знак «минус» указывает на работу внутренних сил.

Подставив в выражение (3.15) формулы (3.10), получим:

$$\begin{aligned} & \frac{E}{2(1+\nu)} \int_0^H \frac{\partial}{\partial x} [W'(x) \cdot \psi(z)] \cdot \psi(z) \cdot dz - \\ & - \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \int_0^H W(x) \cdot \psi'(z) \cdot \psi'(z) dz + q(x) = 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Преобразовав выражение (3.16), получим обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{E}{2(1+\nu)} W''(x) \int_0^H \psi^2(z) \cdot dz - \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} W(x) \int_0^H [\psi'(z)]^2 \cdot dz + q(x) = 0. \quad (3.17)$$

Введем переобозначения:

$$2t = \frac{E}{2(1+\nu)} \int_0^H \psi^2(z) \cdot dz = A \cdot r_1, [\text{МН} \cdot \text{м}^2];$$

$$r_1 = \int_0^H \psi^2(z) \cdot dz, [\text{м}^4]; \quad A = \frac{E}{2(1+\nu)}, \left[\frac{\text{МН}}{\text{м}^2} \right];$$

$$k = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \int_0^H [\psi'(z)]^2 \cdot dz = B \cdot s_1, [\text{МН}];$$

$$s_1 = \int_0^H [\psi'(z)]^2 \cdot dz, [\text{м}^2]; \quad B = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \left[\frac{\text{МН}}{\text{м}^2} \right].$$
(3.18)

Уравнение (3.17) с постоянными коэффициентами запишем в кратком виде:

$$2tW'' - kW + q(x) = 0. \quad (3.19)$$

Влияние касательных напряжений учтено в первом слагаемом уравнения.

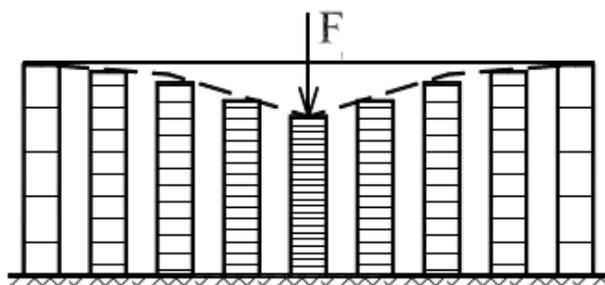


Рисунок 3.36. Модель В.З. Власова

Модель В.З. Власова представляет собой систему упругих элементов (столбиков), между которыми возникают касательные напряжения, включающие в работу соседние элементы (рис. 3.36).

3.3.2. Определение напряженно-деформированного состояния упругого основания при взаимодействии со сваяй

Для определения осадки сваи от действия внешней нагрузки рассмотрим конструктивную схему сваи с мерзлым грунтовым ядром (рис. 3.37, а), полученную в параграфе 3.2. Расчетную схему построили на основе допущения, что ядро, сформированное вокруг сваи, имеет форму, близкую к цилиндру. Замена формы ядра на эквивалентный цилиндр проведена на основе равенства объемов двух фигур (рис. 3.37, б).

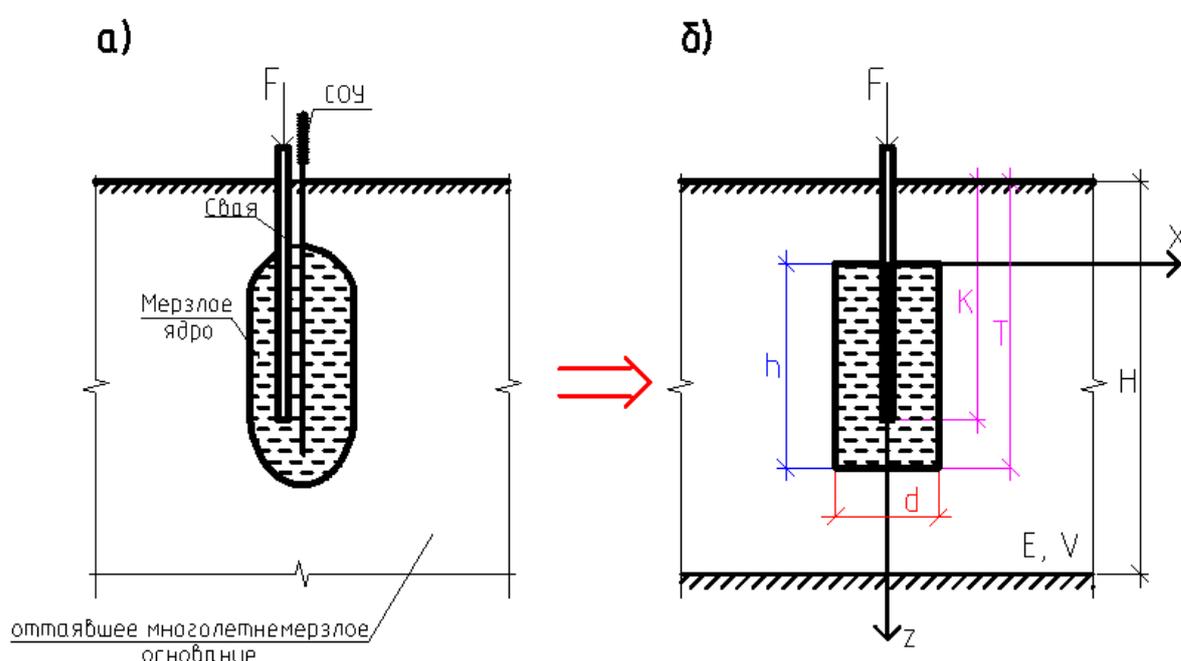


Рисунок 3.37. Конструктивная (а) и расчетная (б) схемы сваи с ядром

Для изучения взаимодействия сваи с основанием рассмотрим двумерную модель (плоскую задачу) упругой сжимаемой толщи грунта высотой H (см. параграф 3.3.1), описываемую дифференциальным уравнением (3.19). Свая со сформированным ядром работает как единая конструкция без проскальзывания по отношению друг к другу (см. параграф 3.2). Взаимодействие сваи с оттаявшим многолетнемерзлым основанием происходит как по боковой, так и по лобовой поверхностям.

Начало координат совместим с верхним сечением ядра. В силу симметрии задачи относительно вертикальной оси внешнюю нагрузку разделим пополам:

$\frac{F}{2}$, [МН] (рис. 3.38) и все решения получим для положительной полуоси OX .

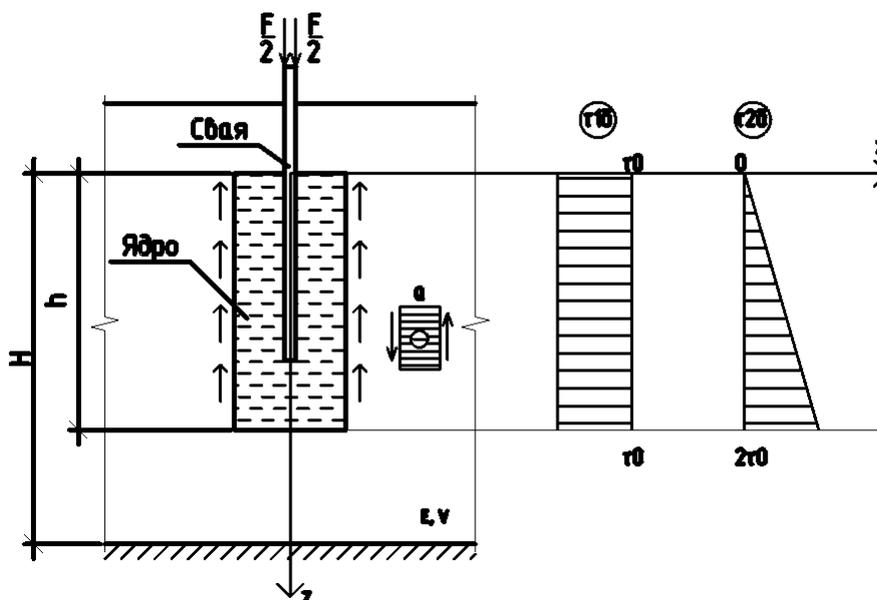


Рисунок 3.38. Действие касательных напряжений при взаимодействии свай с основанием
 Нагрузка $\frac{F}{2}$ распределяется между боковой (F_6 [МН/м]) и лобовой ($F_л$, [МН/м]) поверхностями:

$$\frac{F}{2} = \frac{1}{2} (F_6 + F_л) \cdot \delta, \quad \delta = 1 \text{ м.} \quad (3.20)$$

Рассмотрены два случая действия касательных напряжений (рис. 3.38):

–равномерное:

$$\tau_1^6 = \frac{F_6}{A_{св}} = \tau_0, \quad (3.21)$$

где $A_{св}$ – площадь боковой поверхности свай,

–линейное:

$$\tau_2^6 = \frac{2F_6}{A_{св}} \cdot \frac{z}{h_{св}} = 2\tau_0 \cdot \frac{z}{h_{св}}. \quad (3.22)$$

Для половины действия внешней нагрузки имеем:

$$\frac{\tau_1^6}{2} = -\frac{F_6}{2A_{св}} = -\frac{\tau_0}{2}, \quad (3.23)$$

$$\frac{\tau_2^6}{2} = -\frac{2F_6}{2A_{св}} \cdot \frac{z}{h_{св}} = -\tau_0 \cdot \frac{z}{h_{св}}, \quad (3.34)$$

Правило знаков, как для поперечной силы, показано на рисунке 3.38. Суммарное лобовое сопротивление свай $F_л$ действует на пяту свай (рис. 3.39). Для полосовой нагрузки $F_л$ имеется фундаментальное решение (задача Фламана),

на основе которого записывается решение для распределенной по пяте сваи нагрузки $\sigma_{л}$, равной:

$$\sigma_{л} = -\frac{F_{л}}{A_{усл}}, \quad (3.35)$$

где $A_{усл} = 1 \text{ м} \cdot d$, d – диаметр ядра.

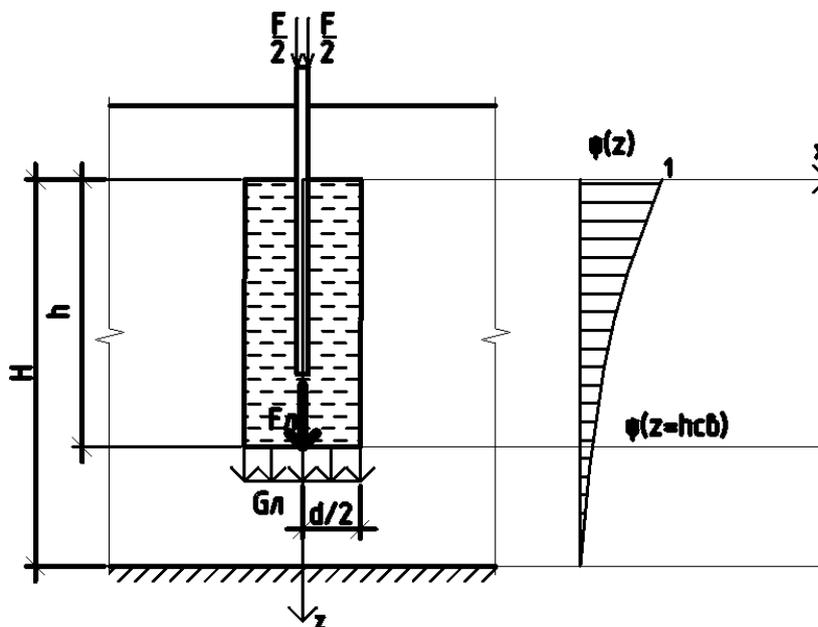


Рисунок 3.39. Лобовое сопротивление по пяте сваи: $F_{л}$ – в виде сосредоточенной силы; $\sigma_{л}$ – в виде нормальных напряжений

Для касательных напряжений ($-\frac{\tau}{2}$, рис. 3.40) работа внешних сил $-\frac{\tau}{2} \cdot 1 \cdot dz$ на возможном перемещении $\psi(z)$ равна $(-\frac{\tau}{2} \cdot 1 \cdot dz) \cdot \psi(z)$. Знак «минус» принят согласно правилу знаков для поперечной силы (рис. 3.38).

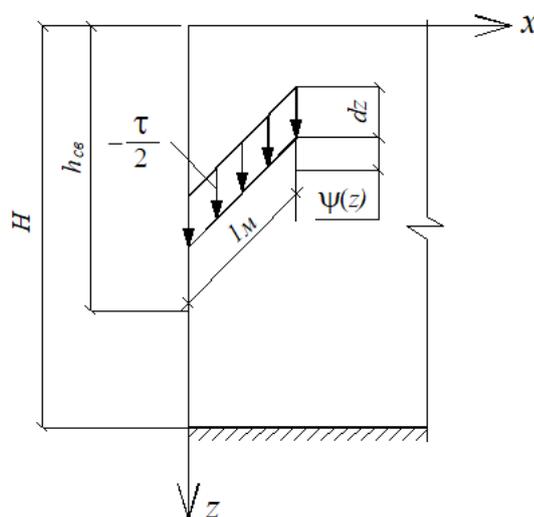


Рисунок 3.40. Распределение касательных напряжений в единичном слое грунта

С учетом распределения касательных напряжений (рис. 3.38), работы внешних сил, действующих на боковую поверхность сваи, равны:

$$A_1^6 = - \int_0^{h_{\text{св}}} \frac{\tau_1^6}{2} \cdot \psi(z) \cdot dA = - \int_0^{h_{\text{св}}} \frac{\tau_0}{2} \cdot \psi(z) \cdot dz = -\tau_0 \cdot a_{11}, \quad (3.36)$$

где $a_{11} = \frac{1}{2} \int_0^{h_{\text{св}}} \psi(z) \cdot dz$;

$$\begin{aligned} A_2^6 &= - \int_0^{h_{\text{св}}} \frac{\tau_2^6}{2} \cdot \psi(z) \cdot dA = - \int_0^{h_{\text{св}}} \tau_0 \cdot \frac{z}{h_{\text{св}}} \cdot \psi(z) \cdot dz = \\ &= -\tau_0 \cdot b_{11}, \end{aligned} \quad (3.37)$$

где $b_{11} = \frac{1}{h_{\text{св}}} \int_0^{h_{\text{св}}} z \cdot \psi(z) \cdot dz$.

Запишем работу внешних сил, действующих на пяту сваи. Сначала рассмотрим задачу Фламана о действии полосовой нагрузки $F_{\text{л}}$, в которой деформированное состояние грунта описывается с помощью дифференциального уравнения (см. параграф 3.2.1, формулу 3.19):

$$\begin{aligned} 2t \cdot W''(x) - k \cdot W(x) + q(x) &= 0, \\ k &= \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \int_0^H [\psi'(z)]^2 \cdot dz = B \cdot s_1, [\text{МН}], \\ 2t &= \frac{E}{2(1+\nu)} \int_0^H \psi^2(z) \cdot dz = A \cdot r_1, [\text{МН} \cdot \text{м}^2], \end{aligned}$$

решением которого является функция:

$$W(x) = C \cdot e^{-\alpha x}, \alpha = \sqrt{\frac{k}{2t}}, \left[\frac{1}{\text{М}} \right].$$

Дополним уравнение (см. параграф 3.2.1, формулу 3.19) граничным условием (равенством работ) по пяте сваи:

$$\Sigma \delta A_{ke}(x=0; z=h_{\text{св}}) = \Sigma \delta A_{ki}(x=0; z=h_{\text{св}})$$

и найдем константу C .

Работа внешних сил, действующих на пяту сваи, равна:

$$A_1^{\text{л}} = -\frac{F_{\text{л}}}{2} \cdot \psi(z=h_{\text{св}}), \quad (3.38)$$

где график $\psi(z)$ приведен на рисунке 3.39.

Работа внутренних вертикальных сил в сечении $(0; h_{\text{св}})$ на участке длиной $\delta = 1$ м равна:

$$A(x=0) = \int_0^H \tau_{zx} \cdot \psi(z) dz = \frac{E}{2(1+\nu)} W'(x=0) \int_0^H \psi^2(z) dz = 2t \cdot W'(x=0). \quad (3.39)$$

Согласно принципу возможных перемещений, для граничного условия имеем выражение:

$$-\frac{F_L}{2} \cdot \psi(z = h_{\text{св}}) = 2t \cdot W'(x=0), \quad (3.40)$$

или

$$-\frac{F_L}{2} \cdot \psi(z = h_{\text{св}}) = 2t \cdot (-C \cdot \alpha) \cdot e^{-\alpha(x=0)}, \quad (3.41)$$

из которого найдем C и $W(x)$:

$$C = \frac{F_L \cdot \psi(z = h_{\text{св}})}{4t\alpha}, \quad (3.42)$$

$$W(x) = C \cdot e^{-\alpha x} = \frac{F_L \cdot \delta \cdot \psi(z = h_{\text{св}})}{4t\alpha} \cdot e^{-\alpha x}. \quad (3.43)$$

От фундаментального решения (3.43) перейдем к решению о распределенной нагрузке $q(\xi) = \sigma_L$. В решении (3.43) вместо $\frac{F_L}{2}$ запишем силу $q(\xi) \cdot d\xi$, тогда:

$$W(x) = \frac{q(\xi) \cdot d\xi \cdot \delta \cdot \psi(z = h_{\text{св}})}{2t\alpha} \cdot e^{-\alpha \cdot (x - \xi)}. \quad (3.44)$$

Интегрирование по ξ проводится на отрезке $\left[0; \frac{d}{2}\right]$ (рис. 3.39), сдвиг по координате $(x - \xi)$ означает, что начало координат переносится в точку приложения силы.

После интегрирования в пределах $0 \leq x \leq \frac{d}{2}$ вертикальные перемещения определяются по формуле:

$$\begin{aligned}
 W(x) &= \frac{\psi(z = h_{\text{св}})}{2t \cdot \alpha} \cdot \sigma_{\text{л}} \cdot \left[\int_0^{\frac{d}{2}} e^{-\alpha \cdot (x-\xi)} \cdot d\xi \right] = \\
 &= \frac{\psi(z = h_{\text{св}})}{2t \cdot \alpha} \cdot \sigma_{\text{л}} \cdot \left[\frac{1}{\alpha} e^{-\alpha(x-\xi)} \Big|_0^{\frac{d}{2}} \right] = \\
 &= \frac{\psi(z = h_{\text{св}})}{2t \cdot \alpha^2} \cdot \sigma_{\text{л}} \cdot \delta \cdot \left[e^{-\alpha(x-\frac{d}{2})} - e^{-\alpha \cdot x} \right] = \\
 &= \frac{\psi(z=h_{\text{св}})}{2t \cdot \alpha \cdot \alpha} \cdot \sigma_{\text{л}} \cdot \left[e^{-\alpha(x-\frac{d}{2})} - e^{-\alpha \cdot x} \right] \cdot \delta, \\
 &2t \cdot \alpha^2 = k.
 \end{aligned} \tag{3.45}$$

В случае $x = \frac{d}{2}$ получим упрощенную формулу работы нормальных напряжений $\sigma_{\text{л}}$ на отрезке $\left[0; \frac{d}{2}\right]$:

$$A_2^{\text{л}} = -\sigma_{\text{л}} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \psi(z = h_{\text{св}}) \cdot \left[1 - e^{-\alpha \cdot \frac{d}{2}} \right] \cdot \delta. \tag{3.46}$$

Отличие формулы (3.38) от формулы (3.46) в сомножителе $\frac{1}{\alpha} \left[1 - e^{-\alpha \cdot \frac{d}{2}} \right]$, который учитывает действие распределенной нагрузки по пяте сваи, в отличие от действия на пяту сваи сосредоточенной силы.

Все формулы, приведенные ниже, получены для лобового сопротивления $\sigma_{\text{л}}$ (рис. 3.39).

Работа внешней силы суммируется из работ внешних сил, действующих на боковую поверхность и пяту:

$$A_i = A_i^{\text{б}} + A^{\text{л}}, \quad i = 1, 2. \tag{3.47}$$

Индекс i указывает на вид распределения касательных напряжений по боковой поверхности сваи (рис. 3.38):

- равномерный, которому соответствует следующее выражение для работы:

$$A_1 = - \left[\tau_0 \cdot a_{11} + \frac{F_{\text{л}}}{2} \cdot \psi(z = h_{\text{св}}) \right] \Rightarrow C_1. \tag{3.48}$$

$$a_{11} = \frac{1}{2} \int_0^{h_{\text{CB}}} \psi(z) \cdot dz,$$

– и линейный (треугольный):

$$A_2 = - \left[\tau_0 \cdot b_{11} + \frac{F_L}{2k} \cdot \psi(z = h_{\text{CB}}) \cdot \{1 - e^{-\alpha \cdot \frac{d}{2}}\} \right] \Rightarrow C_2, \quad (3.49)$$

$$b_{11} = \frac{1}{h_{\text{CB}}} \int_0^{h_{\text{CB}}} z \cdot \psi(z) \cdot dz.$$

Работа внутренних сил запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} A(x = 0) &= \int_0^H \tau_{zx} \cdot \psi(z) \cdot dA = \\ &= \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot W'(x = 0) \int_0^H \psi^2(z) \cdot dz = 2t \cdot W'(x = 0). \end{aligned} \quad (3.50)$$

Из равенства работ внешних и внутренних сил в начале координат для разных случаев распределения касательных напряжений находим константу C_i :

$$A_i(x = 0) = 2t \cdot (-\alpha \cdot C_i) \cdot 1, \quad (3.51)$$

$$C_i = -\frac{S_i(x=0)}{2t \cdot \alpha}, \text{ где } i = 1, 2.$$

Или:

$$C_1 = -\frac{1}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\tau_0 \cdot a_{11} + \frac{F_L}{2} \cdot \delta \cdot \psi(z = h_{\text{CB}}) \right]; \quad (3.52)$$

$$C_2 = -\frac{1}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\tau_0 \cdot b_{11} + \frac{F_L}{2} \cdot \delta \cdot \psi(z = h_{\text{CB}}) \cdot \left\{ 1 - e^{-\alpha \cdot \frac{d}{2}} \right\} \right]. \quad (3.53)$$

Приведем окончательные формулы для определения вертикальных перемещений произвольной точки грунта:

$$w_i(x, z) = W_i(x) \cdot \psi(z) = C_i \cdot e^{-\alpha x} \cdot \psi(z), \quad i = 1, 2. \quad (3.54)$$

$$w_1(x, z) = -\frac{1}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\tau_0 \cdot a_{11} + \frac{F_L}{2} \cdot \psi(z = h_{\text{CB}}) \right] \cdot e^{-\alpha x} \cdot \psi(z), \quad (3.55)$$

$$w_2(x, z) = -\frac{1}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\tau_0 \cdot b_{11} + \frac{1}{k} \cdot \frac{F_L}{2} \cdot \psi(z = h_{\text{CB}}) \cdot \left\{ 1 - e^{-\alpha \cdot \frac{d}{2}} \right\} \right] \cdot e^{-\alpha x} \cdot \psi(z). \quad (3.56)$$

Для практических задач интерес представляет частный случай вертикальных перемещений при $x = 0, z = 0$, то есть осадка грунта:

$$S_i = w_i(x = 0, z = 0) = C_i \cdot \psi(0). \quad (3.57)$$

Напряженное состояние точек грунтового основания описывается следующими формулами:

$$\begin{cases} \sigma_z = \left[\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right] \cdot W(x) \cdot \psi'(z), \\ \tau_{zx} = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} W'(x) \cdot \psi(z), \quad \tau_{l,zx} = 0. \end{cases} \quad (3.58)$$

С учетом вышеизложенного приведем окончательные формулы для напряжений:

$$\sigma_z^1 = - \left[\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right] \cdot \left[\tau_0 \cdot a_{11} + \frac{1}{k} \cdot \frac{F_L}{2} \cdot \psi(z = h_{CB}) \cdot \left\{ 1 - e^{-\alpha \frac{d}{2}} \right\} \right] \cdot e^{-\alpha x} \cdot \psi'(z), \quad (3.59)$$

$$\sigma_z^2 = - \left[\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right] \cdot \left[\tau_0 \cdot b_{11} + \frac{1}{k} \cdot \frac{F_L}{2} \cdot \psi(z = h_{CB}) \cdot \left\{ 1 - e^{-\alpha \frac{d}{2}} \right\} \right] \cdot e^{-\alpha x} \cdot \psi'(z), \quad (3.60)$$

$$\tau_{zx}^1 = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \cdot [-\alpha \cdot C_1 \cdot e^{-\alpha x} \cdot \psi(z)], \quad (3.61)$$

$$\tau_{zx}^2 = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \cdot [-\alpha \cdot C_2 \cdot e^{-\alpha x} \cdot \psi(z)], \quad (3.62)$$

где коэффициенты определяются по следующим формулам:

$$\alpha = \sqrt{\frac{k}{2t}}, \quad \left[\frac{1}{M} \right], \quad 2t = A \cdot r_1, \quad [MN \cdot M^2];$$

$$A = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad [MПа]; \quad r_1 = \int_0^H [\psi(z)]^2 dz, \quad [M^4];$$

$$k = B(s_1 + s_2) + B \cdot s_1, \quad [MN];$$

$$B = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad [MПа];$$

$$s_1 = \int_0^H [\psi'(z)]^2 dz, \quad [M^2];$$

$$s_2 = \int_0^H \psi(z) \cdot \psi''(z) dz, \quad [M^2];$$

$$a_{11} = \frac{1}{2} \int_0^{h_{CB}} \psi(z) dz, \quad [M^3];$$

$$b_{11} = \frac{1}{h_{CB}} \int_0^{h_{CB}} z \cdot \psi(z) dz, \quad [M^3].$$

Запишем окончательные формулы определения осадки сваи для разных видов распределения касательных напряжений с учетом пропорционального разделения внешней нагрузки, действующей на сваю, между лобовой и боковой поверхностями через коэффициент пропорциональности β , который определяется экспериментально:

$$F_6 = \beta \cdot F_l, \beta > 0; \quad (3.63)$$

$$F = (F_6 + F_l) = F_l + (\beta \cdot F_l) = F_l + (1 + \beta); \quad (3.64)$$

$$F_l = \frac{F}{(\beta+1)}; \quad (3.65)$$

$$F_6 = \frac{\beta \cdot F}{\beta+1}. \quad (3.66)$$

где F – внешняя нагрузка, действующая на сваю;

F_6 – нагрузка, действующая на боковую поверхность сваи;

F_l – нагрузка, действующая на лобовую поверхность сваи.

В случае равномерного распределения касательных напряжений по боковой поверхности осадка сваи, с учетом формул 3.63–3.66, вычисляется по следующей формуле:

$$S_1 = C_1 \cdot \psi(0); \quad (3.67)$$

$$S_1 = -\frac{1}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\tau_0 \cdot a_{11} + \frac{F_l}{2} \cdot \psi(z = h_{CB}) \right] \cdot \psi(0); \quad (3.68)$$

$$S_1 = -\frac{F}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\frac{\beta}{(\beta + 1) \cdot A_{CB}} \cdot a_{11} + \frac{1}{2 \cdot (\beta + 1)} \cdot \psi(z = h_{CB}) \right] \cdot \psi(0). \quad (3.69)$$

В случае треугольного распределения касательных напряжений по боковой поверхности осадка сваи, с учетом формул 3.63–3.66, вычисляется по следующей формуле:

$$S_2 = C_2 \cdot \psi(0); \quad (3.70)$$

$$S_2 = -\frac{1}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\tau_0 \cdot b_{11} + \frac{F_l}{2} \cdot \delta \cdot \psi(z = h_{CB}) \cdot \left\{ 1 - e^{-\alpha \cdot \frac{d}{2}} \right\} \right] \cdot \psi(0); \quad (3.71)$$

$$S_2 = -\frac{F}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\frac{\beta \cdot z}{(\beta+1) \cdot A_{CB} \cdot h_{CB}} \cdot b_{11} + \frac{1}{2 \cdot (\beta+1)} \cdot \psi(z = h_{CB}) \cdot \left\{ 1 - e^{-\alpha \cdot \frac{d}{2}} \right\} \right] \cdot \psi(0). \quad (3.72)$$

Напряженно-деформированное состояние грунтового основания описывается формулами (3.55, 3.56, 3.59–3.62). Величина осадки сваи со

сформированным мерзлым грунтовым ядром на линейном участке графика «нагрузки – осадки» определяется выражениями (3.69, 3.72), с учетом коэффициентов a_{11} и b_{11} , зависящих в том числе и от механических свойств грунта.

3.3.3. Определение осадки сваи на втором участке при нелинейном деформировании грунта

Значение осадки сваи S_2 на втором участке определим по методу Малышева М.В. и Никитиной Н.С. для определения осадки фундаментов в нелинейной стадии деформирования грунта. Данный метод базируется на дробно-линейной зависимости осадки от действия внешней нагрузки. В точке перехода от линейного участка к нелинейному участку кривой «нагрузки – осадки» отсутствует излом. Осадка S_2 в интервале изменения давлений в неупругой стадии работы грунта $F_1 \leq F \leq F_2$ рассчитывается по следующему выражению:

$$S_2 = S_1 \frac{F(F_2 - F_1) - (F - F_1)F_1}{F_1(F_2 - F)}, \quad (3.73)$$

где F_2 – нагрузка, равная исчерпанию несущей способности пяты сваи;

F – приращение нагрузки на сваю с момента окончания линейной зависимости между напряжениями и деформациями;

F_1 – нагрузка, воспринимаемая пятой сваи на этапе окончания линейной зависимости между напряжениями и деформациями.

3.4. Выводы по главе 3

1. Проведена серия прогнозных теплотехнических расчетов термостабилизируемого грунтового основания для определения основных геометрических параметров мерзлого грунтового ядра, формирующегося вокруг одиночной железобетонной сваи, в зависимости от конструктивных параметров СОУ и грунтовых условий площадки строительства по климатическим условиям г. Лабытнанги (ЯНАО).
2. Разработана аналитическая методика определения осадки сваи со сформированным мерзлым грунтовым ядром в термостабилизируемом основании, сложенном оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами. Методика позволяет определять напряженно-деформированное состояние грунтового основания. Для апробации предложенной методики проведены натурные экспериментальные исследования (см. главу 4) с последующим сопоставлением (рис. 4.17, 4.18) полученных экспериментальных данных с аналитическими результатами.

ГЛАВА 4. НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СВАЙ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ

4.1. Цель и задачи натуральных исследований

Целью проведения натуральных исследований являлось изучение характера и особенностей работы одиночных железобетонных свай в термостабилизируемом основании, представленном оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами, с учетом фактора времени.

Для достижения цели исследования поставлены следующие задачи:

- определение несущей способности свай в оттаявшем многолетнемерзлом грунтовом основании;
- определение несущей способности свай в термостабилизируемом основании, представленном оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами, в конце летнего периода;
- оценка вклада в несущую способность свай сопротивления грунта по боковой поверхности и сопротивления грунта под пятой путем разделения статических испытаний грунтов сваями на действие вдавливающих и выдергивающих нагрузок;
- определение изменения несущей способности свай путем сопоставления результатов испытаний оттаявших и термостабилизируемых грунтов сваями статической вдавливающей и выдергивающей нагрузками;
- выявление закономерностей изменения температурного режима и деформированного состояния термостабилизируемого основания в процессе проведения статических испытаний грунтов сваями;
- оценка геометрических параметров формируемых мерзлых грунтовых ядер вокруг свай при термостабилизации оттаявшего многолетнемерзлого основания СОУ.

Полевые исследования проводились в период с 03.2023 г. по 11.2024 г.

4.2. Место проведения натурального исследования

Натурные исследования проведены на экспериментальной площадке карбонового полигона «Семь лиственниц», расположенного вблизи г. Лабытнанги (ЯНАО). В апреле 2023 г. на площадке эксперимента проведены инженерные изыскания специалистами сектора геотехники Научного центра изучения Арктики. Площадка находится на вершине и склонах холма, сложенного ледниковыми отложениями, вокруг вышки высотой 200 м на землях лесного фонда на южной границе лесотундры. Климат субарктический с сухой зимой (средняя температура января $-23,1$ °С) и прохладным летом (средняя температура июля $+15,0$ °С). Площадка находится на высоте над уровнем моря около 104 м. Согласно карте природных комплексов севера Западной Сибири, территория карбонового полигона «Семь лиственниц» относится к северо-таежным подпровинциям ледниковых и озерно-аллювиальных равнин (приуральский южный район). Зональные типы – лесотундровые. Генезис ландшафта – ледниковый, III г. Геоморфологический тип равнин: возвышенные, расчлененные, без линейно-грядовых форм. Литолого-фациальный комплекс: суглинистый с редким включением гравия и гальки, пески пылеватые. Многолетняя мерзлота в пределах всей площади полигона имеет островное распространение, глубина сезонного оттаивания/промерзания варьируется от 0,8 до 2,9 м. Снег лежит с сентября по май. Преобладают кустарниковые, кустарничковые ассоциации и лиственничное редколесье. Заболоченные участки встречаются в эрозионных понижениях и по берегам небольших озер. Поверхность прилегающей к площадке лесотундры представлена бугристым микрорельефом с высотой бугров 0,4 м; диаметром 0,5–1,5 м. На исследуемой территории из криогенных процессов можно выделить термокарст, заболачивание, неравномерное пучение, осадку грунтов. На экспериментальной площадке в ходе проведения инженерно-геологических изысканий вскрыт горизонт подземных вод на отметке 3,48–3,63 м от уровня дневной поверхности земли. Верхний слой площадки представлен почвенно-растительным слоем с

моховой и кустарниковой растительностью. Характер напластования грунтов экспериментальной площадки представлен на рисунке 4.1.

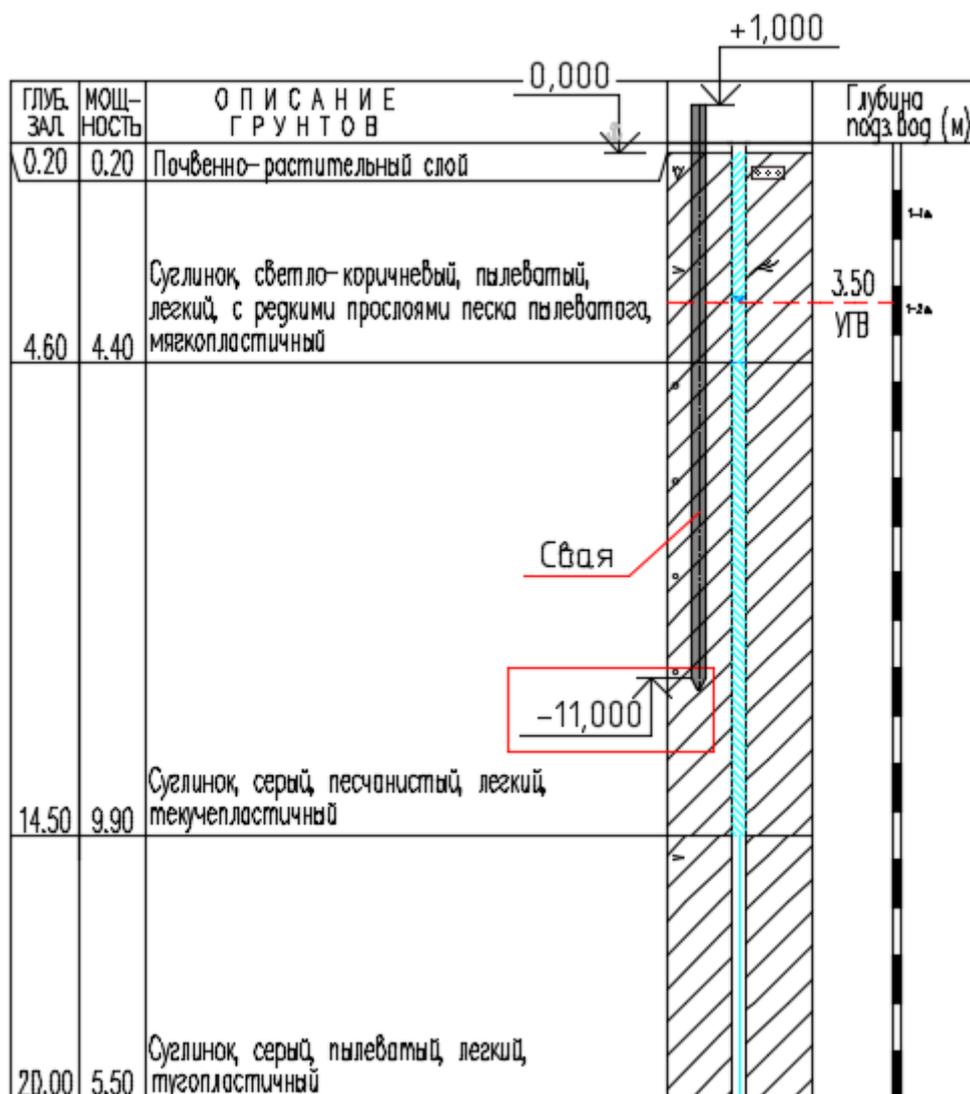


Рисунок 4.1. Геологический разрез площадки эксперимента

Грунты экспериментальной площадки, согласно классификации [67, 68], выделены в три инженерно-геологических слоя:

- инженерно-геологический слой № 1: суглинок светло-коричневый, пылеватый, легкий, с редкими прослоями песка пылеватого, мягкопластичный, с редким включением остатков растений, ожелезненный;
- инженерно-геологический слой № 2: суглинок серый, песчанистый, легкий, текучепластичный, с включением до 10 % гравия с интервалом 10 м;

- инженерно-геологический слой № 3: суглинок серый, пылеватый, легкий, тугопластичный.

Физико-механические и теплофизические свойства грунтов, определенные по [21, 22, 23], приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Физико-механические и теплофизические свойства грунтов

Индекс, ед. изм.	ИГЭ-1 (суглинок мягкопластичный)	ИГЭ-2 (суглинок текучепластичный)	ИГЭ-3 (суглинок тугопластичный)
W, д.ед	0,46	0,28	0,24
ρ , г/см ³	1,77	1,90	1,95
e, д.е	1,26	0,83	0,73
I _L , д.е	1,61	0,64	0,39
I _p , д.е	13,1	11,3	11,0
c, кПа	8	11	15
φ , град.	10	14	18
ρ_d , г/см ³	1,21	1,48	1,57
E _{оed} , МПа	5	8	14
λ_f , Вт/(м·К)	2,09	2,20	2,27
λ_{th} , Вт/(м·К)	1,69	1,69	1,76
C _f , МДж/(м ³ ·К)	1,83	1,93	2,19
C _{th} , МДж/(м ³ ·К)	2,26	2,19	2,62
T _{bf} , °С	-0,2	-0,2	-0,2

4.3. Подготовка к проведению натурального исследования

Для проведения натуральных экспериментальных исследований взаимодействия свай с термостабилизируемым грунтовым основанием проведены следующие подготовительные виды работ:

1. Геодезическая разметка мест погружения свай.
2. Погружение свай согласно схеме, представленной на рисунке 4.2.

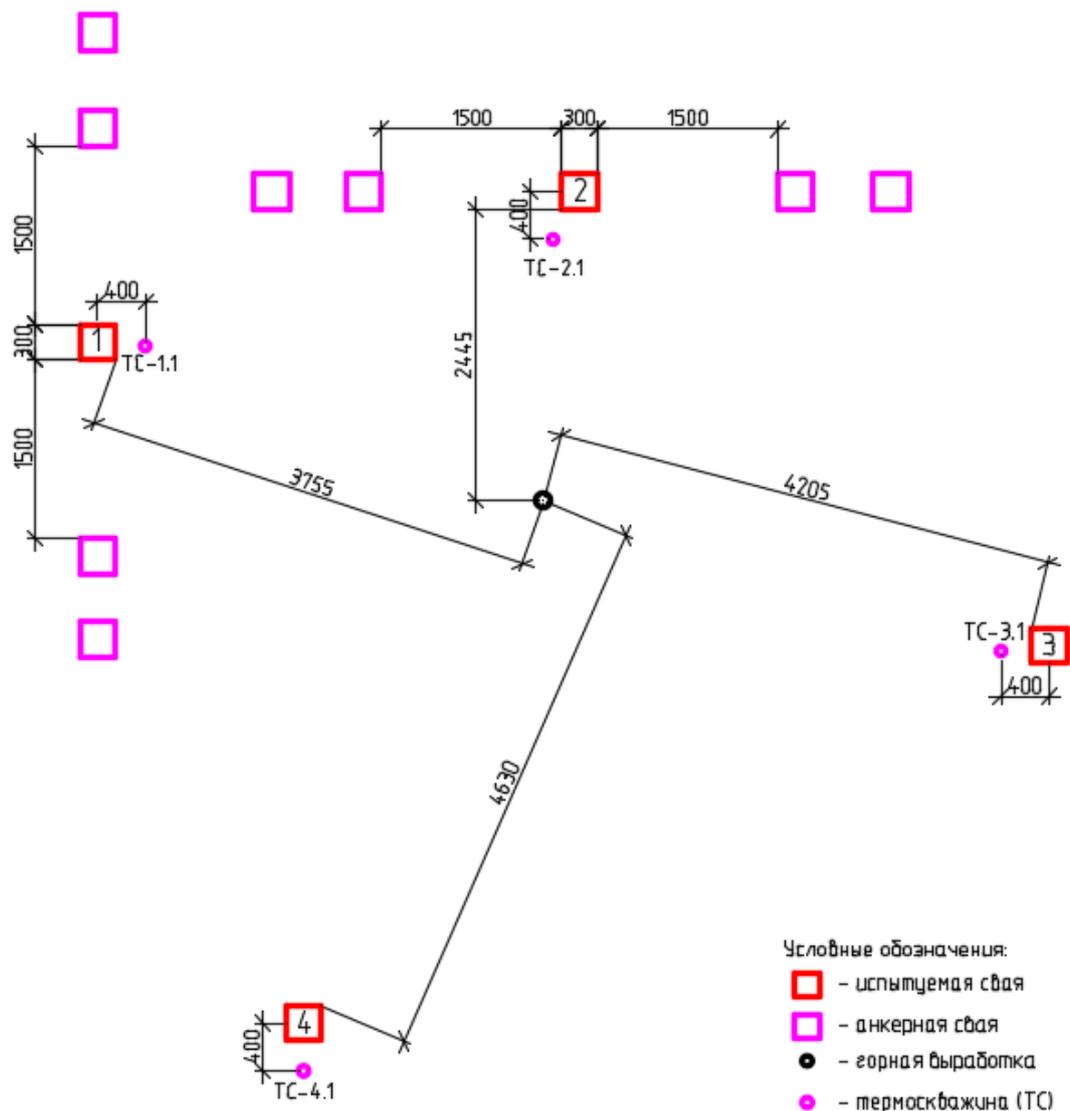


Рисунок 4.2. Схема расположения свай и термометрических скважин (ТС)

На экспериментальной площадке карбонового полигона, общий вид которого представлен на рисунке 4.3, для проведения исследований были погружены четыре испытательные железобетонные сваи марки С 120.30-10у и восемь анкерных железобетонных свай марки С 120.30-10у (табл. 4.2).



Рисунок 4.3. Общий вид карбонового полигона

Таблица 4.2. Характеристики свай

Марка свай	Геометрические размеры, см			Объем изделия, м ³	Вес изделия, т	Марка бетона	Количество, шт
	Длина	Ширина	Высота				
С 120.30-10у	1200	30	30	1,09	2,73	В35	12

Пята испытуемых свай погружена в суглинок, серый, песчанистый, легкий, текучепластичный (ИГЭ-2) не менее чем на 1 м (рис. 4.1). Величина погружения испытуемых свай в грунтовое основание равна 10,55–11,05 м, величина погружения анкерных свай в грунтовое основание равна 9,55–10,05 м. Для предотвращения смерзания грунта и боковой поверхности испытуемых свай в деятельном слое произвели окраску кремнийорганической эмалью КО-174 поверхности бетона свай, находящейся в деятельном слое, на величину 3 м. Испытуемые сваи погружены на расстоянии не менее 1 м и не более 5 м от выполненной геологической выработки. Погружение свай производили сваебойной установкой СП-49. Общий вид расположения свай на экспериментальной площадке представлен на рисунке 4.4.

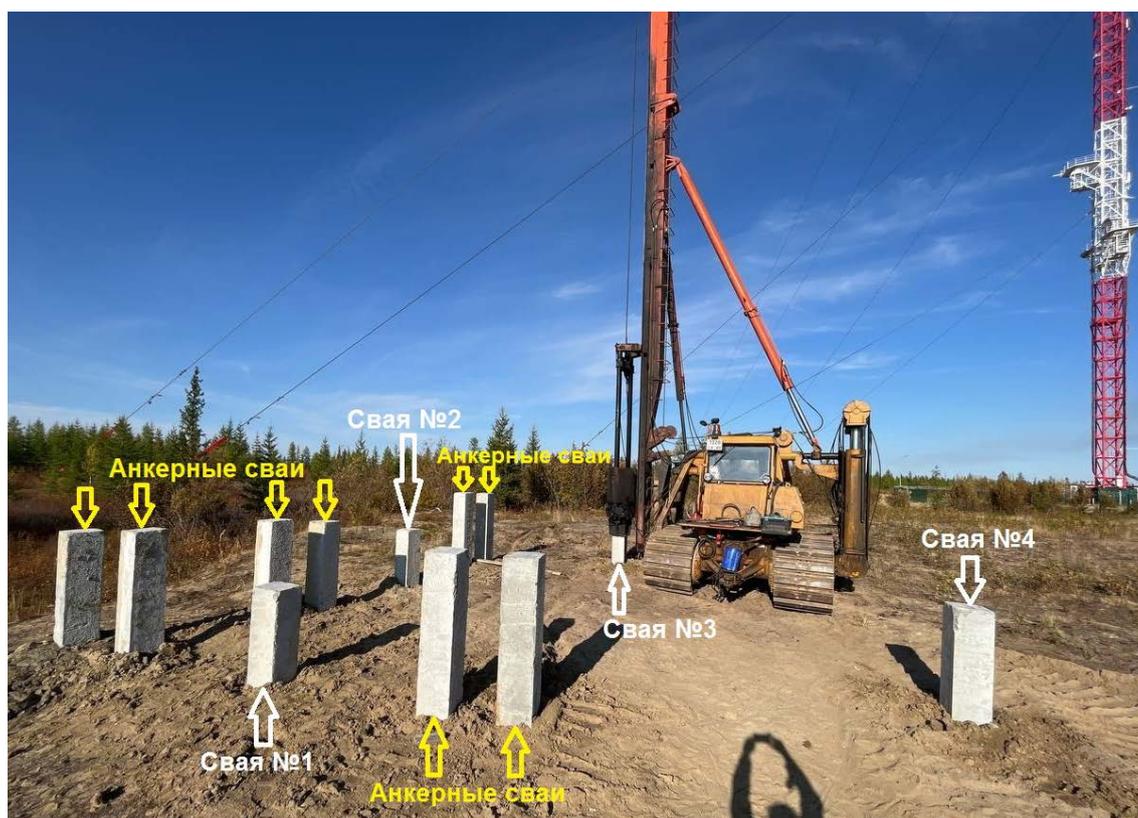


Рисунок 4.4. Общий вид расположения свай

3. Устройство термометрических скважин не далее 1 м от боковых поверхностей испытываемых свай с глубиной погружения на 2 м ниже пяты испытываемых свай. Всего на подготовительном этапе были выполнены 4 термометрические скважины (рис. 4.2).

Между моментом завершения подготовительных видов работ и началом испытаний грунтов сваями статической вдавливающей и выдергивающей нагрузками прошло 20 суток. Данный промежуток времени («отдых» свай) необходим для восстановления связи грунта с поверхностями свай и стабилизации поровых давлений в грунтовом массиве до начального уровня. В процессе погружения свай проводили фотофиксацию, представленную на рисунке 4.5.

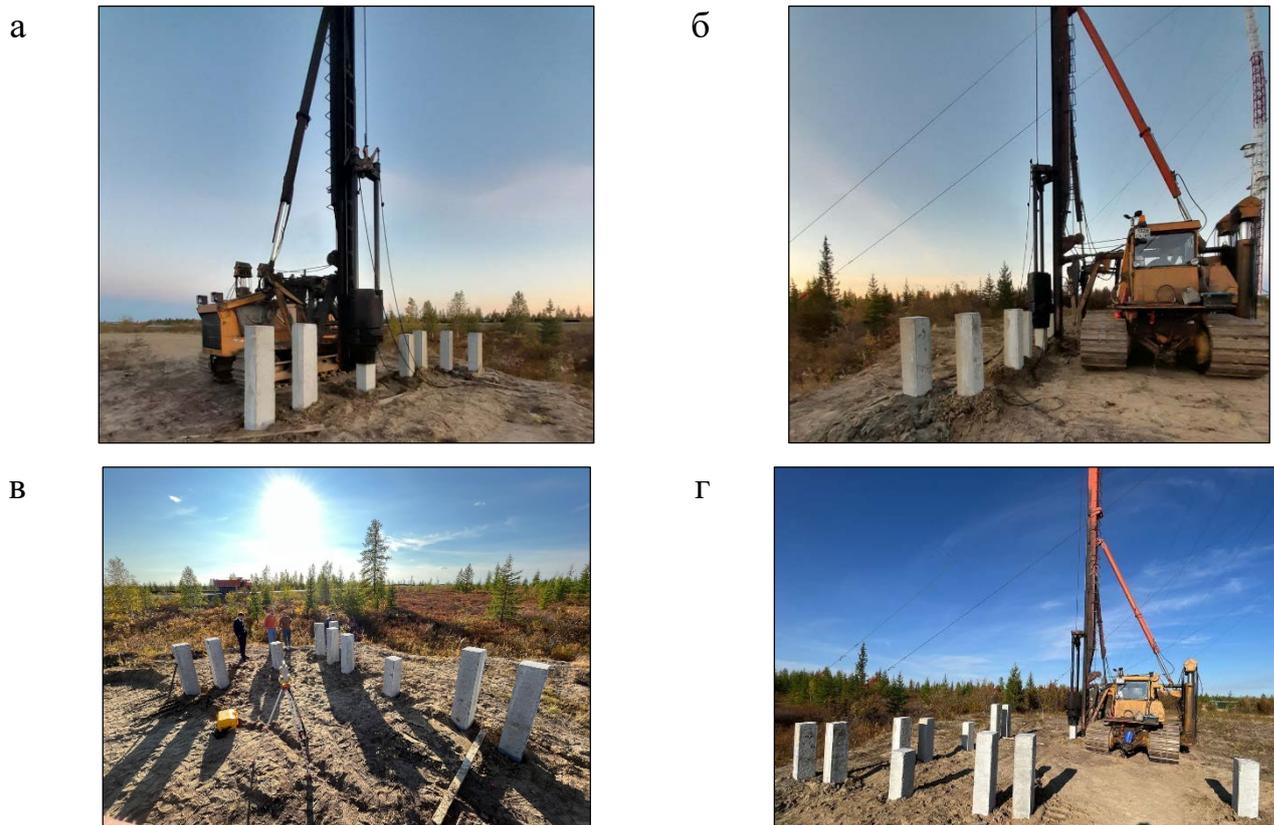


Рисунок 4.5. Погружение свай на площадке эксперимента: а, б – процесс погружения свай; в – геодезические работы; г – общий вид расположения свай

4.4. Проведение и результаты натурного исследования

Экспериментальная часть в полевых условиях состояла из 2 этапов:

- первый: испытания оттаявших многолетнемерзлых грунтов сваями до установки СОУ;
- второй: испытания термостабилизируемых грунтов сваями со сформированным мерзлым грунтовым ядром в конце летнего периода (сентябрь – октябрь).

При проведении исследований сваи № 1, 2 нагружали статическими вдавливающими нагрузками, а сваи № 3, 4 – статическими выдергивающими нагрузками. Испытания были разделены на действие вдавливающих и выдергивающих нагрузок для определения несущей способности как по боковой поверхности, так и по пяте сваи.

Перед началом проведения этапа № 1 выполнены замеры температуры грунтов у каждой испытуемой сваи путем погружения термометрических кос с многозонными цифровыми датчиками температуры в термометрические скважины. По результатам замеров температуры грунтов установлено их

оттаявшее состояние и определены значения температуры грунтов вблизи испытуемых свай (табл. 4.3).

Таблица 4.3. Температуры грунтов

№ сваи	Температура грунта на глубине 11 м – отметка пяты сваи, °С
1	+0,0
2	+0,0
3	+0,0
4	+0,0

Графики замеров температуры грунтов представлены на рисунке 4.6.

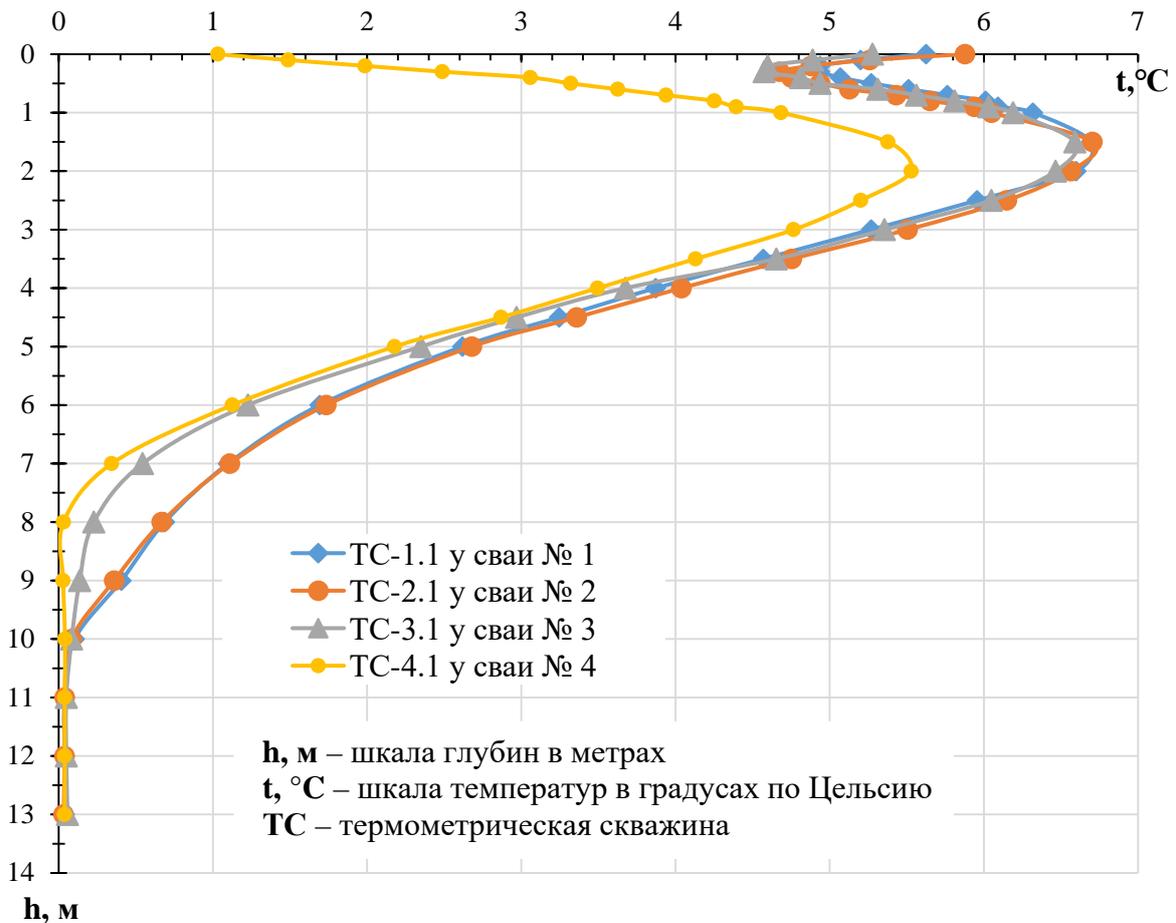


Рисунок 4.6. График распределения температуры $t^{\circ}\text{C}$ грунта по глубине h

Общий вид площадки эксперимента в период проведения испытаний оттаявших многолетнемерзлых грунтов сваями на этапе № 1 (сентябрь 2023 г.) до установки СОУ представлен на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7. Общий вид площадки эксперимента на этапе № 1

Испытания оттаявших многолетнемерзлых грунтов сваями проводили в соответствии с пунктом 8 [69]. Нагрузки испытываемых свай производили с помощью универсального одностороннего домкрата грузоподъемностью 100 тс, нагнетание давления производили при помощи ручного гидравлического насоса с манометром.

При нагружении вдавливающей нагрузкой домкрат устанавливали на оголовки испытываемой сваи в центре ее поперечного сечения. Для восприятия усилия от домкрата монтировали стальную двутавровую балку, жестко закрепленную к анкерным сваям. Для измерения вертикальных перемещений испытываемой сваи устанавливали симметрично по отношению к геометрической оси поперечного сечения испытываемой сваи два индикатора часового типа с погрешностью измерений не более 0,1 мм.

Нагрузку на испытываемые сваи передавали ступенчато, равномерно, без ударов. Величина ступени нагружения принималась не более 1/10 от возможной наибольшей нагрузки на сваю.

В соответствии с прогнозным теоретическим расчетом несущей способности свай по [133] и данными статического зондирования величина ступени нагружения принята:

- не более 1,5 тс для испытания грунтов сваями № 1 и 2 статическими вдавливающими нагрузками;

– не более 0,75 тс для испытания грунтов сваями № 3 и 4 статическими выдергивающими нагрузками.

При проведении испытаний регистрировали значения показаний со всех приборов измерения деформаций на каждой ступени нагружения сваи в следующем порядке: нулевые показания перед началом нагружения, первое снятие показаний осуществлялось непосредственно после приложения нагрузки. Последующие три измерения проводились с интервалом 30 мин. Далее производили почасовые измерения до достижения условной стабилизации деформаций.

Нагрузку на каждой ступени нагружения выдерживали до условной стабилизации деформации сваи в грунте. Критерием условной стабилизации деформации при действии вдавливающих нагрузок принято значение осадки на ступени нагружения, не превышающее 0,1 мм за последние 120 мин. наблюдений, так как под пятой сваи находятся глинистые грунты мягкопластичной консистенции. При нагружении свай выдергивающей нагрузкой критерием условной стабилизации принят выход сваи на ступени нагружения, не превышающий 0,1 мм за последние 2 ч наблюдений.

Сваю нагружали вдавливающей нагрузкой до достижения общей осадки в 40 мм и более. Испытание на выдергивание проводили до достижения величины выдергивающей нагрузки, при которой выход сваи из грунта составил не менее 10 мм.

Разгружение испытуемых свай после завершения испытаний производили ступенчато. Величина ступени разгружения равна удвоенному значению величины ступени нагружения. Продолжительность ступени разгружения составляла не менее 15 мин. Значения показаний перемещений с приборов при разгружении снимали сразу после каждой ступени разгружения и через 15 мин. наблюдений.

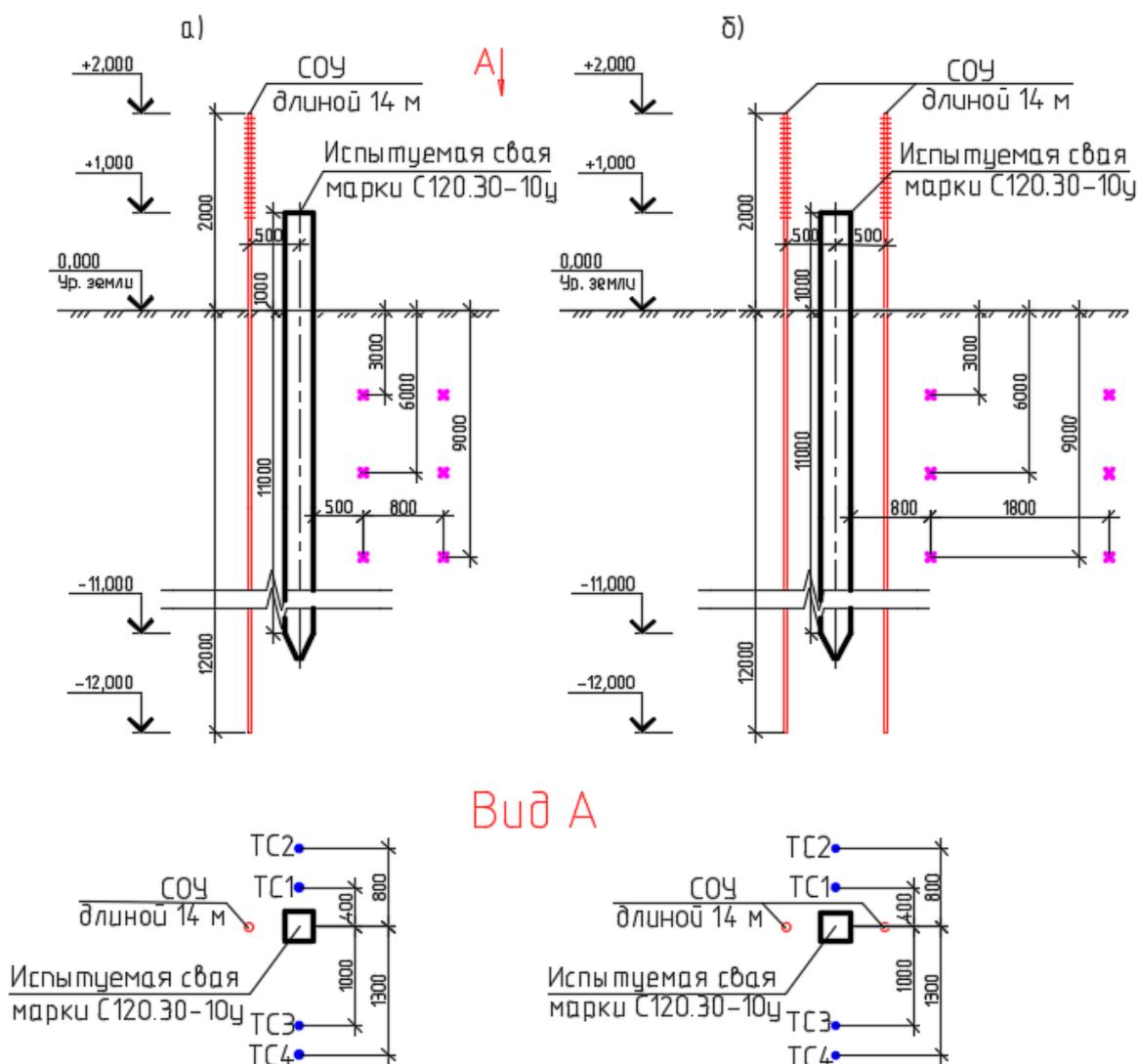
После завершения разгружения (до нулевых значений) продолжали наблюдения за упругими перемещениями в течение 1 ч, так как под пятой сваи находятся глинистые грунты. Отчеты с приборов снимали через каждые 15 мин.

Фотофиксация полевых испытаний оттаявших многолетнемерзлых грунтов сваями на этапе № 1 (сентябрь 2023 г.) до установки СОУ представлена на рисунке 4.8. Результаты исследований, полученных на этапе № 1, представлены на рисунках 4.17, 4.18 (область отрицательных значений – при действии вдавливающих нагрузок, область положительных значений – при действии выдергивающих нагрузок).



Рисунок 4.8. Общий вид установок для проведения статических испытаний грунтов сваями на этапе № 1: а – испытание грунтов свай № 1 статической вдавливающей нагрузкой; б – испытание грунтов свай № 3 статической выдергивающей нагрузкой; в – испытание грунтов свай № 2 статической вдавливающей нагрузкой; г – испытание грунтов свай № 4 статической выдергивающей нагрузкой

После завершения этапа № 1 установили по одному СОУ у свай № 1, 3 и по два СОУ у свай № 2, 4, произвели погружение грунтовых марок и устройство дополнительных термометрических скважин, согласно схеме, представленной на рисунке 4.9.



Условные обозначения:

- ✱ – место установки грунтовой марки
- – термометрическая скважина (ТС)

Рисунок 4.9. Схема расположения СОУ, термометрических скважин (ТС) и грунтовых марок: а – у свай № 1, 3 с одним СОУ; б – у свай № 2, 4 с двумя СОУ

Для термостабилизации оттаявшего многолетнемерзлого грунтового основания использовали одиночные вертикальные парожидкостные термостабилизаторы грунта производства ООО НПО «Север». Изделия изготовлены в соответствии с ТУ 3642-001-17556598-2014 изм. 1–5. Термостабилизатор грунта вертикальный с изоляцией в слое сезонного оттаивания грунта – теплообменное устройство парожидкостного типа сезонного действия. СОУ представлен единой неразъемной конструкцией, заполненной охлаждающей жидкостью (углекислотой). СОУ работает автономно без внешних источников энергии и конструктивно состоит из трех

частей: испарительной, транспортной и конденсаторной. Ниже конденсатора расположен изолированный участок, который предотвращает развитие сил морозного пучения, действующих на свайные фундаменты, на этапе набора мощности (начало зимнего периода). СОУ заправлен нетоксичным и взрывобезопасным хладагентом R744. Основные технические характеристики СОУ представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Основные технические характеристики СОУ

Эскиз	Технические характеристики	Ед. изм.	Показатели
	Марка (условное обозначение)	—	ТСГ.В.И 38-14 МЗ
	Рабочее тело	—	R744 (CO ₂) ГОСТ 8050, высший сорт
	Материал оребрения конденсатора	—	Сплав АД0 ГОСТ 4784-2019
	Материал корпуса испарителя	—	Сталь 20 ГОСТ 10704-91
	Длина (габарит) термостабилизатора Н	мм	14000±20
	Высота конденсатора А	мм	1540
	Расстояние от низа конденсатора до изолированного участка С	мм	300
	Высота надземной части h*	мм	Определяется проектом
	Длина испарителя L	мм	12160
	Длина изолированного участка L _{isol}	мм	3000
	Диаметр оребрения конденсатора D	мм	65
	Диаметр испарителя d ₁	мм	38
	Диаметр изоляции d ₂	мм	50
	Режим работы (для ЯНАО)	—	октябрь—апрель
	Масса заправленного рабочего тела	кг	2,1
Коэффициент теплоотдачи от конденсатора к воздуху при V _в = 3 м/с	$\frac{Вт}{м^2 \times ^\circ C}$	38,1	
Масса термостабилизатора в сборе	кг	44	

Рабочее положение испарителя – вертикальное или слабонаклонное, конденсатора – вертикальное. СОУ начинает работать при разности температур воздуха и грунта равной, в среднем, 8–10 °С. Из-за разности температур образуется перепад давлений между испарительной и транспортной частями,

вследствие чего хладагент в испарительной части начинает испаряться и подниматься в конденсаторную часть. В конденсаторной части пары хладагента охлаждаются и конденсируют на внутренней поверхности конденсаторной части, то есть протекает рециркуляция хладагента и происходит охлаждение (замораживание) массива грунта. СОУ погружали на глубину 12 м (рис. 4.9) в предварительно пробуренные скважины диаметром 108 мм с использованием буровой установки ПБУ-2 на базе автомобиля КАМАЗ. Пространство между стенками скважины и корпусом СОУ заполняли буровым шламом. В зимний период проводили тепловизионную съемку для контроля работоспособности СОУ. Разность температур между поверхностями конденсаторной и транспортной частей составляла от нескольких градусов до нескольких десятков градусов. Разность температур зависела от соотношения температуры окружающего воздуха и грунтового основания. Косвенный контроль работоспособности СОУ проводили по данным термометрического мониторинга.

В процессе устройства термометрических скважин и погружения СОУ выполнена фотофиксация, представленная на рисунке 4.10.

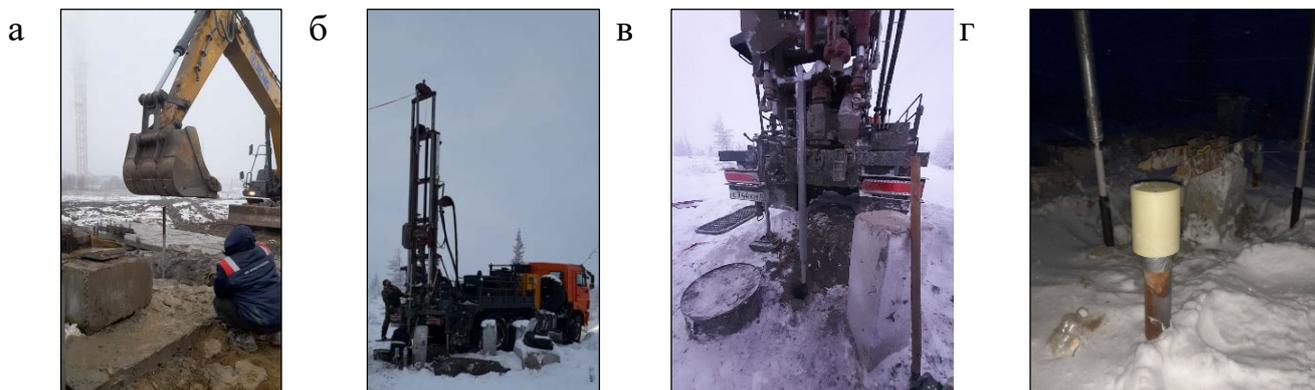


Рисунок 4.10. Процесс устройства термометрических скважин (а) и погружения СОУ (б–г)

С октября 2023 г. начался первый цикл термостабилизации грунтов. Замеры температуры грунтов производили непрерывно в режиме реального времени с регистрацией данных каждые 24 ч. Общий вид площадки эксперимента в период первого зимнего цикла работы СОУ (декабрь 2023 г) представлен на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11. Площадка эксперимента в период первого зимнего цикла работы СОУ

Одновременно с температурным мониторингом проводилось моделирование температурного режима основания в сертифицированном расчетном комплексе Frost 3D, предназначенном для прогнозных теплотехнических расчетов и прогноза состояния мерзлых грунтов. В основу работы расчетного комплекса заложено уравнение теплопроводности с учетом фазовых превращений. Уравнение теплопроводности в трехмерной постановке решено с использованием метода конечных разностей.

Расчетная модель термостабилизируемого грунтового основания размерами $30 \times 30 \times 25$ м с погруженной в него сваем представлена на рисунке 4.12.

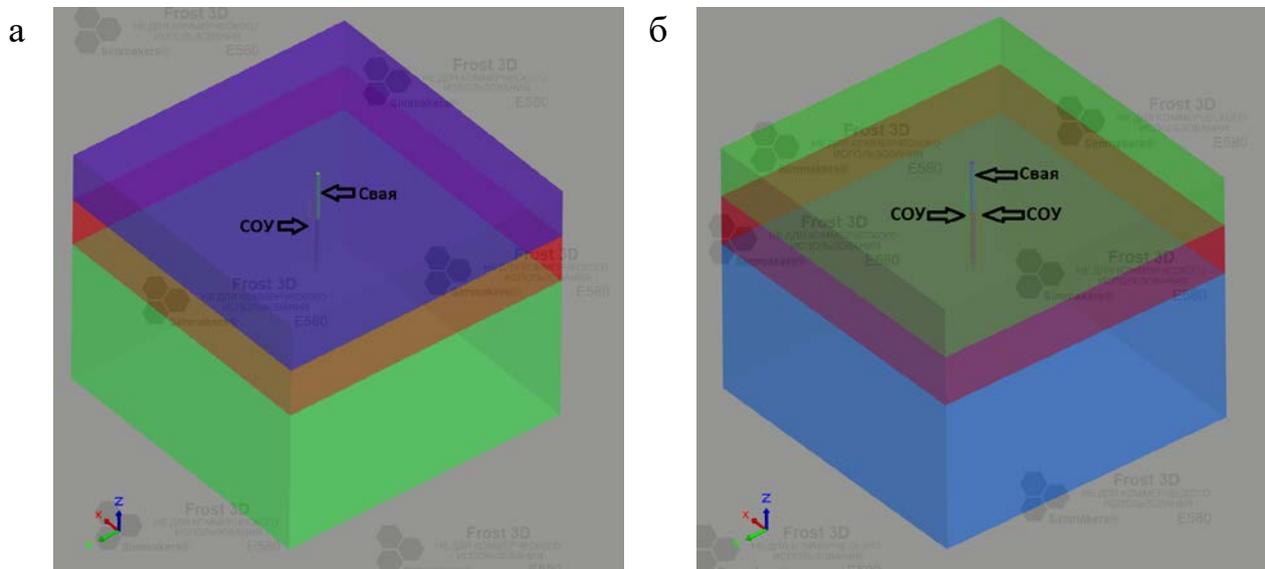


Рисунок 4.12. Расчетная модель термостабилизируемого грунтового основания с погруженной в него сваем: а – с одним СОУ; б – с двумя СОУ

Начальная температура грунтов задавалась по результатам измерений в термометрических скважинах (рис. 4.6) до начала проведения эксперимента. Характер напластования и теплофизические свойства грунтов приняты по данным инженерно-геологических изысканий, представленных в параграфе 4.2. Граничные условия по дневной поверхности и работа СОУ заданы третьим

родом с учетом температуры воздуха и скорости ветра по климатическим данным ближайшей метеостанции г. Лабитнанги (ЯНАО). Конструктивные параметры СОУ приняты согласно паспорту технических условий завода изготовителя (табл. 4.4). На нижней и боковых гранях расчетной модели заданы граничные условия второго рода: тепловой поток, равный нулю. По результатам моделирования получено трехмерное распределение температуры грунтов, установлен процесс формирования мерзлых грунтовых ядер вокруг свай, определены их размеры и геометрическое положение. На рисунке 4.13 представлены температуры грунтов по результатам измерений (усредненные значения) и по данным расчетов в программе Frost 3D.

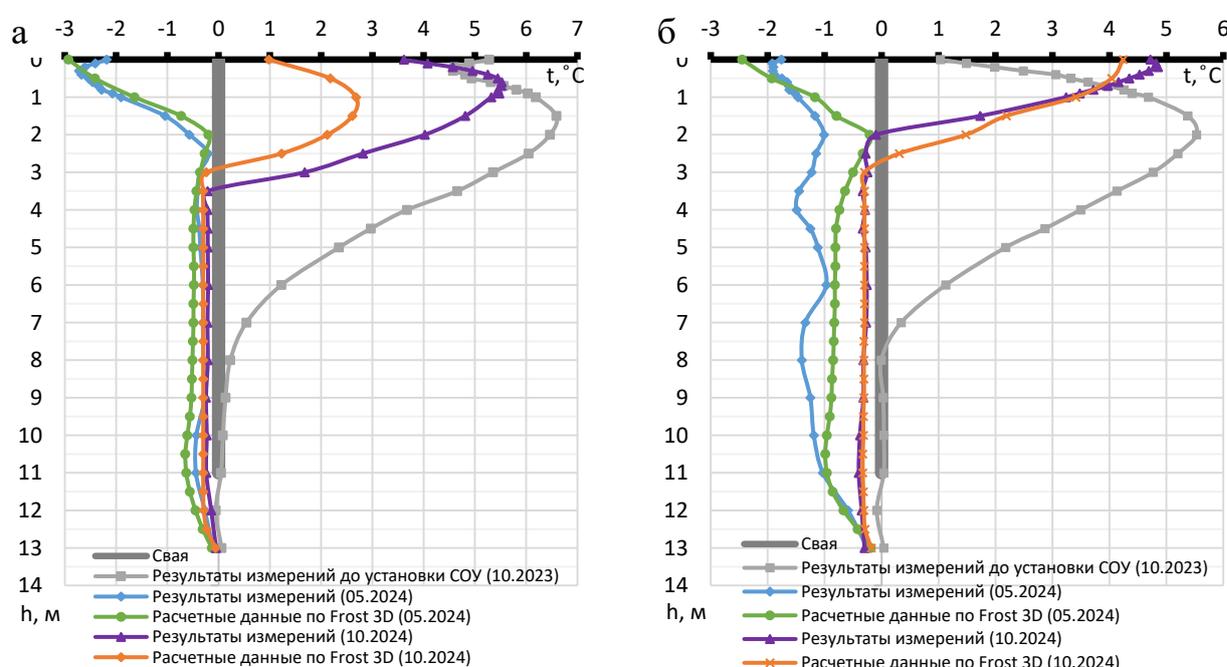


Рисунок 4.13. Графики распределения температуры грунтов: а – у свай № 1, 3 с одним СОУ; б – у свай № 2, 4 с двумя СОУ

По данным расчетов, в конце первого летнего периода у свай с одним и двумя СОУ средний диаметр ядра равен 0,8 и 2,3 м, высота – 7,7 и 10 м соответственно. Размеры ядра определены по температуре начала замерзания грунтов основания. Средняя погрешность размеров ядер по результатам моделирования по отношению к фактическим значениям, определенным методом интерполяции температуры в термометрических скважинах, составляет до 20 %. По температурным данным (рис. 4.13) определены средние значения

температуры грунта по боковой поверхности смерзания со сваями (без учета мощности деятельного слоя) на этапе № 2 (табл. № 4.5).

Таблица 4.5. Температуры грунта по боковой поверхности смерзания со сваями

Период	№ свай	
	Сваи № 1, 3 с одним СОУ	Сваи № 2, 4 с двумя СОУ
В конце I зимнего периода	$-0,4^{\circ}\text{C}$	$-1,3^{\circ}\text{C}$
	$-0,5^{\circ}\text{C}$	$-0,8^{\circ}\text{C}$
В конце I летнего периода	$-0,2^{\circ}\text{C}$	$-0,3^{\circ}\text{C}$
	$-0,3^{\circ}\text{C}$	$-0,3^{\circ}\text{C}$

Примечание: значения температуры, указанные над чертой, получены по результатам измерений; под чертой – по данным расчетов в программе Frost 3D.

Средняя погрешность значений температуры грунта по боковой поверхности смерзания со свай по результатам измерения по отношению к расчетным данным составляет $\Delta T = 0,2^{\circ}\text{C}$.

В конце первого летнего периода (сентябрь – октябрь) при максимальном оттаивании основания проведены испытания термостабилизируемых грунтов сваями со сформированным мерзлым грунтовым ядром (этап № 2). Общий вид площадки эксперимента в период проведения испытаний термостабилизируемых грунтов сваями в конце первого летнего периода (сентябрь – октябрь 2024 г.) представлен на рисунке 4.14.



Рисунок 4.14. Общий вид площадки эксперимента на этапе № 2

Испытания термостабилизируемых грунтов сваями проводили согласно пункту 9 [69]. Нагрузку на испытуемые сваи передавали ступенчато, равномерно, без ударов. Величина ступени нагружения принималась не более 1/10 от возможной наибольшей нагрузки на сваю.

В соответствии с прогнозным теоретическим расчетом несущей способности свай по [126] и данными статического зондирования величина ступени нагружения принята:

- не более 5,0 тс для испытания грунтов сваями № 1 и 2 статическими вдавливающими нагрузками;
- не более 2,5 тс для испытания грунтов сваями № 3 и 4 статическими выдергивающими нагрузками.

Продолжительность каждой ступени нагружения, которую выдерживали до условной стабилизации осадки или выхода сваи (стабилизации деформации), принята равной 24 ч. Критерием условной стабилизации деформации принята величина осадки или выхода сваи на текущей ступени нагружения меньшая (или равная) 0,2 мм за последние сутки наблюдений.

При проведении испытаний регистрировали значения показаний со всех приборов измерения деформаций на каждой ступени нагружения сваи в следующем порядке: нулевые показания перед началом нагружения, первое снятие показаний сразу же после приложения нагрузки и далее через 30 мин; 1; 2; 4; 8; 16 и 24 ч и затем с интервалами каждые сутки.

Нагружение сваи проводили до величины, когда осадка нарастала с увеличивающейся скоростью. Критерием завершения испытания принято значение осадки или выхода сваи, не менее чем в три раза, превышающего значение осадки или выхода сваи на предыдущей ступени при общей осадке не менее 2,5 см или выходе не менее 1 см.

Разгружение испытуемых свай после завершения испытаний выполняли ступенчато. Величина ступени разгружения равна удвоенному значению величины ступени нагружения. Продолжительность ступени разгружения составляла не менее 15 мин. По данным перемещений свай и грунтовых марок, полученных при проведении испытаний, выявлено, что мерзлые ядра перемещаются и работают совместно со сваями.

Фотофиксация полевых испытаний термостабилизируемых грунтов сваями со сформированным мерзлым грунтовым ядром в конце первого летнего периода (сентябрь – октябрь 2024 г.) представлена на рисунке 4.15.



Рисунок 4.15. Общий вид установок для проведения статических испытаний термостабилизируемых грунтов сваями на этапе № 2: а – испытание грунтов свай № 1 статической вдавливающей нагрузкой (1 СОУ); б – испытание грунтов свай № 3 статической выдергивающей нагрузкой (1 СОУ); в – испытание грунтов свай № 2 статической вдавливающей нагрузкой (2 СОУ); г – испытание грунтов свай № 4 статической выдергивающей нагрузкой (2 СОУ)

Результаты исследований, полученных на этапе № 2, представлены на рисунках 4.17, 4.18 (область отрицательных значений – при действии вдавливающих нагрузок, область положительных значений – при действии выдергивающих нагрузок).

Моделирование взаимодействия свай с оттаявшим и термостабилизируемым основаниями проведено в геотехническом сертифицированном программном комплексе Midas, в котором грунт основания и мерзлое грунтовое ядро моделировались упругопластической моделью Мора – Кулона. Моделирование взаимодействия сваи с грунтовым основанием осуществлено при помощи трехмерных пространственных элементов. Свая и массив грунта моделировались объемными элементами solid, а взаимодействие

на границе свая – мерзлое ядро – грунт моделировалось заданием интерфейсных элементов. Расчетные схемы созданы с учетом исходных данных и параметров, соответствующих реальным условиям проведения статических испытаний. На рисунке 4.16 представлены расчетные схемы грунтового основания с погруженной в него свайей на этапе № 1 до установки СОУ и на этапе № 2 со сформированным мерзлым грунтовым ядром в программном комплексе Midas.

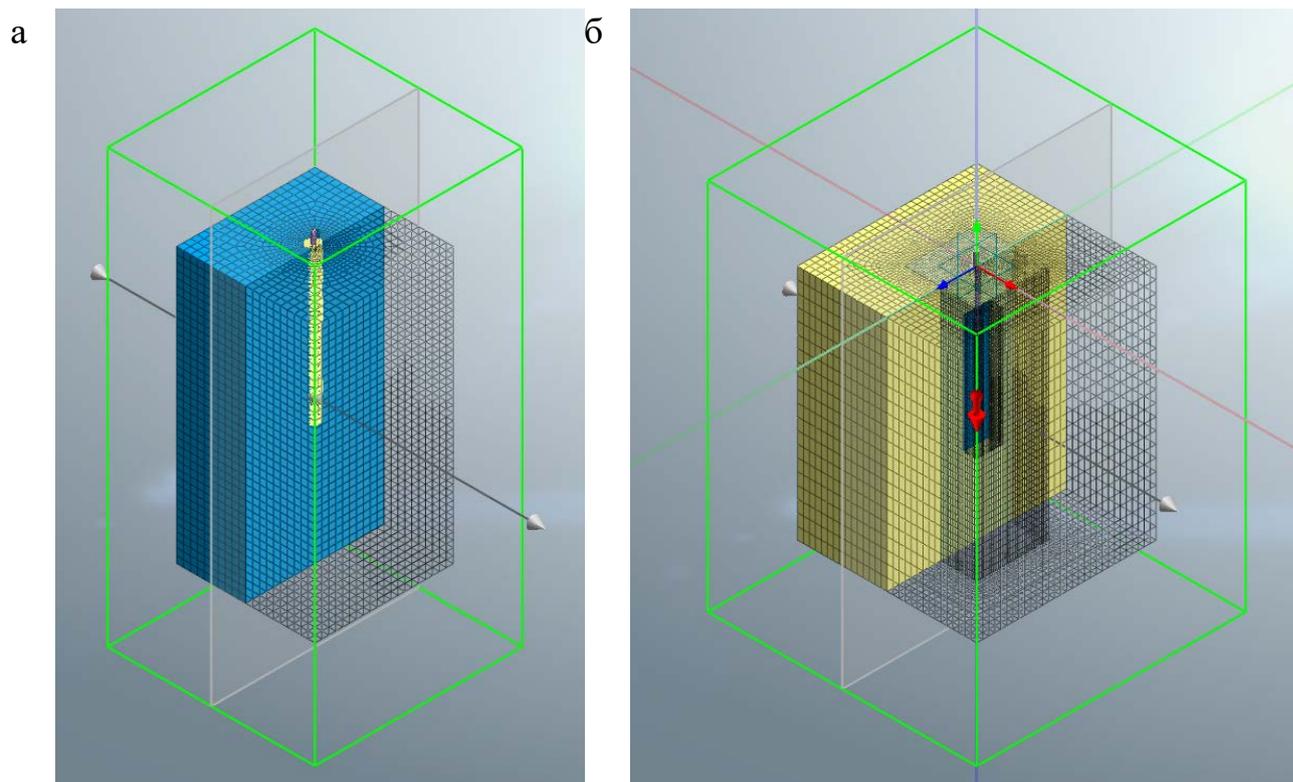


Рисунок 4.16. Расчетная схема грунтового основания с погруженной в него свайей: а – на этапе № 1 до установки СОУ; б – на этапе № 2 со сформированным мерзлым грунтовым ядром

По результатам моделирования построены графические зависимости осадки свай от нагрузки, сопоставленные с данными натурных испытаний и в соответствии с аналитической методикой (рис. 4.17, 4.18).

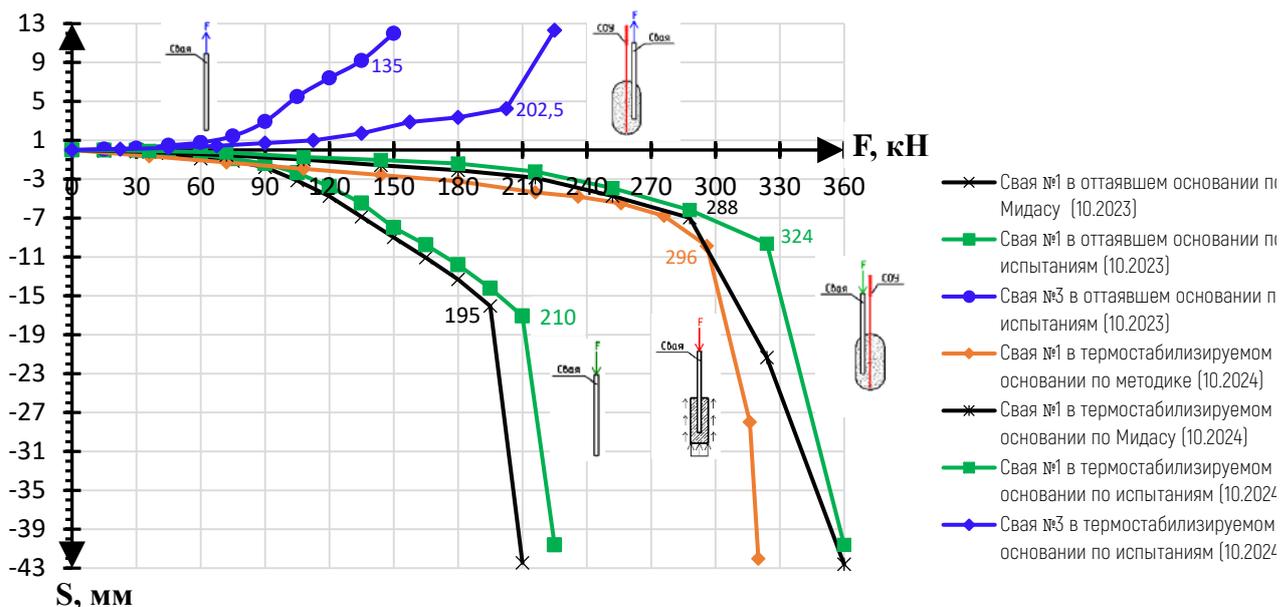


Рисунок 4.17. Графики зависимости осадки (выхода) свай № 1, 3 с одним СОУ от нагрузки F

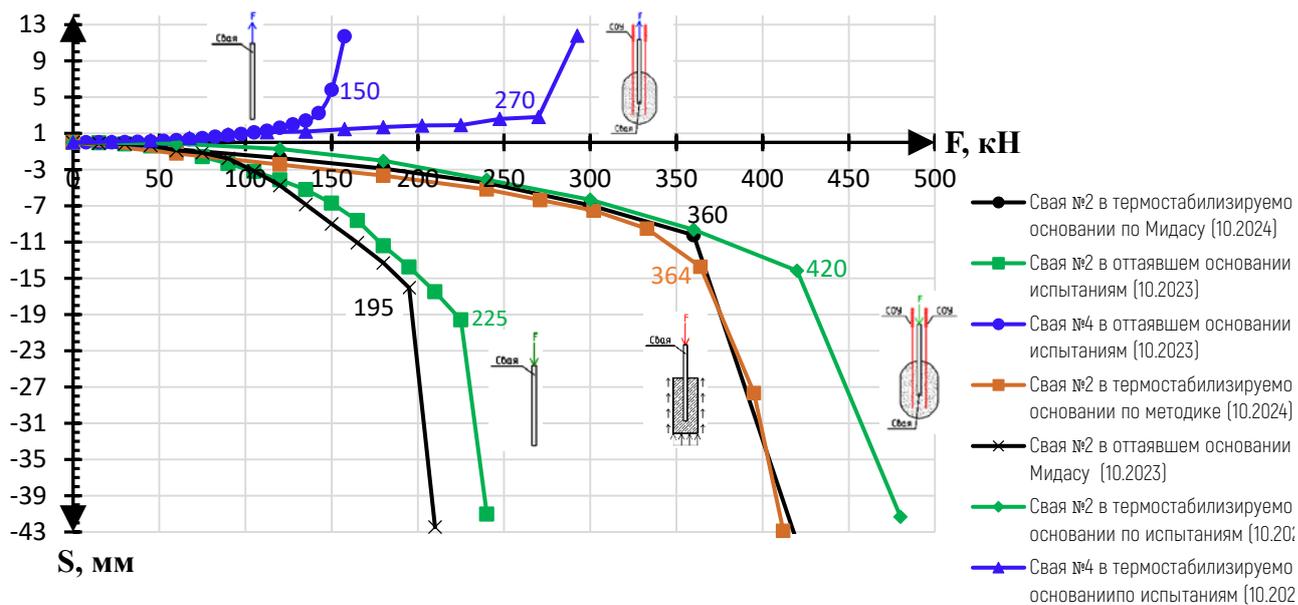


Рисунок 4.18. Графики зависимости осадки (выхода) свай № 2, 4 с двумя СОУ от нагрузки F

Анализируя данные графиков можно выделить 3 характерных участка работы свай при действии вдавливающей нагрузки:

1. Начальный линейный участок (I).
2. Второй линейный участок (II).
3. Нелинейный участок (III).

Анализируя данные графиков, можно выделить 2 характерных участка работы свай при действии выдергивающей нагрузки:

1. Начальный линейный участок (I).
2. Нелинейный участок (II).

На основании полученных графиков «нагрузки – осадки» (рис. 4.17, 4.18) определено значение несущей способности и ее изменение для свай с одним (сваи № 1, 3) и двумя (сваи № 2, 4) СОУ (табл. 4.6).

Таблица 4.6. Несущая способность свай

Этап:	По Midas	По методике	По результатам статических испытаний					
	F _u , кН	F _u , кН	F _u , кН			% прироста F _u к первоначальному значению		
			общая	по боковой поверхности	по пяте	общий	по боковой поверхности	по пяте
% от общей	% от общей							
Свая с одним СОУ								
первый (10.2023)	195	–	210*	135**	75	–	–	–
				64,29	35,71			
второй (10.2024)	288	296	324*	202,5**	121,5	54,29	50	62
				62,5	37,5			
Свая с двумя СОУ								
первый (10.2023)	195	–	225***	150****	75	–	–	–
				66,67	33,33			
второй (10.2024)	360	364	420***	270****	150	86,67	80	100
				64,29	35,71			

Примечания: * значение несущей способности сваи № 1 (с одним СОУ); ** значение несущей способности сваи № 3 (с одним СОУ); *** значение несущей способности сваи № 2 (с двумя СОУ); **** значение несущей способности сваи № 4 (с двумя СОУ).

4.5. Выводы по главе 4

1. В результате проведенных натурных исследований количественно обоснована эффективность локальной термостабилизации оттаявшего многолетнемерзлого грунтового основания с пониженным залеганием кровли мерзлоты для увеличения несущей способности одиночной железобетонной сваи.

2. На основании проведенного геотехнического мониторинга и прогнозных теплотехнических расчетов установлены геометрические параметры формирующихся мерзлых грунтовых ядер вокруг одиночных железобетонных свай.

3. В результате проведения натурных испытаний грунтов сваями статической вдавливающей и выдергивающей нагрузками установлена динамика увеличения несущей способности сваи в оттаявшем грунтовом основании при термостабилизации СОУ. Увеличение несущей способности сваи обусловлено увеличением контактной боковой и лобовой поверхностей за счет формирования мерзлого грунтового ядра, работающего совместно с ней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При проектировании объектов в сложных инженерно-геокриологических условиях криолитозоны, в основании которых залегают толщи оттаявших слабых водонасыщенных грунтов с пониженным залеганием кровли мерзлоты, одним из эффективных методов восстановления и увеличения несущей способности одиночной железобетонной сваи является термостабилизация грунтового основания. В результате применения термостабилизации в данных грунтовых условиях вокруг сваи формируется мерзлое грунтовое ядро, геометрические параметры которого определяют эффективность работы сваи в термостабилизируемом основании.
2. Экспериментальными исследованиями по термостабилизации оттаявшего грунтового основания с погруженной в него сваем установлены закономерности изменения температурного режима в зависимости от конструктивных параметров СОУ, типа и начальной температуры грунтов. В результате изменения температурного режима грунтового основания вокруг сваи формируется мерзлое грунтовое ядро, работающее совместно с ней и увеличивающее ее контактную лобовую и боковую поверхности.
3. На основе выполненных экспериментально-теоретических исследований определены основные геометрические размеры (диаметр, высота, объем) и геометрическое положение подошвы формируемого мерзлого грунтового ядра относительно пяты сваи в зависимости от конструктивных параметров СОУ, типа и начальной температуры грунтов основания. Установлено, что для всех типов оттаявших многолетнемерзлых грунтов возможно три варианта геометрического положения подошвы мерзлого ядра: ниже пяты сваи; в одном уровне с пятой сваи; выше пяты сваи.
4. В результате проведенного натурного исследования на экспериментальной площадке, расположенной вблизи г. Лабытнанги (ЯНАО), определено изменение предельно длительного сопротивления одиночной железобетонной сваи в термостабилизируемом основании, сложенном оттаявшими многолетнемерзлыми суглинками. Выявлено, что установка одного СОУ у

боковой поверхности сваи увеличивает ее частное значение предельно длительного сопротивления в конце первого летнего периода при действии вдавливающей нагрузки на 54 %, а при действии выдергивающей нагрузки – на 50 %. При установке двух СОУ у боковых поверхностей сваи частное значение предельно длительного сопротивления сваи в конце первого летнего периода при действии вдавливающей нагрузки увеличилось на 86 %, а при действии выдергивающей нагрузки – на 80 %.

5. Разработана аналитическая методика определения осадки одиночной железобетонной сваи в термостабилизируемом грунтовом основании, исходя из известного допущения о раздельной работе пяты и боковой поверхности сваи. Методика учитывает экспериментально выявленные геометрические параметры формируемого мерзлого грунтового ядра вокруг сваи и позволяет получить кривую «осадки – нагрузки», повторяющую форму экспериментальной кривой. Средняя погрешность по отношению к фактическим значениям составляет до 25 % в запас несущей способности сваи.
6. Установлено, что использование программы Frost 3D позволяет прогнозировать температурный режим оттаявшего многолетнемерзлого основания с точностью до $\Delta T = 0,2$ °С и определять геометрические параметры мерзлого грунтового ядра, формируемого вокруг сваи, со средней погрешностью по отношению к фактическим параметрам до 20 % при термостабилизации СОУ в конце первого летнего периода. Применение Midas позволяет с точностью до 30 % описывать НДС термостабилизируемого основания с погруженной в него одиночной железобетонной сваей при ее статическом нагружении.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования: исследование применимости метода для других типов грунтов и климатических районов строительства, изучение влияния грунтовых вод на формирование мерзлого ядра вокруг одиночной сваи, свайного куста и свайного фундамента с групповым расположением СОУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baltch J.C. Soil Refrigerating System. Pat. USA. # 3, 220, 470, Cl. 165-40, 1965.
2. Hahn E., Gross U. The influence of the inclination angle on the performance of a closed two-phase thermosyphon // Proc. 4th Int. heat pipe conf. (London, Sept. 1981). – London. – 1981. – P. 125-136.
3. IPCC: Technical Summary [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, E. Poloczanska, K. Minten-beck, M. Tignor, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)] // IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 755 p.
4. Japikse D., Winter R.F. Single – phase transport process in the open thermosyphon // Ibid. – 1971. – 14, N3. – P. 427-441.
5. Jialu Y., Jifu L., Zhemping N. Exergy analysis on heat – pipe heat exchangers // Prepr. 6th Int. heat pipe conf. (Grenoble, May 1987). – Grenoble. – 1987. – P. 451-456.
6. Kolunin V.S., Kolunin A.V. Heat and mass transfer in saturated porous media with ice inclusions // Intern.J.Heat Mass Transfer, – 2006. – V.49. – P.2514-2522.
7. Larkin B.S. An experimental study of two-phase thermosyphon tube // Eng. J. (Canada). – 1971. – 54, N8. – P. 55-62.
8. Lee Y., Mital Y. A two-phase closed thermosyphon // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1972. – 15, N9. – P. 1695-1709.
9. Lock G.S., Maezawa S. The aerosyphon: an exploratory study // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1975. – 18, N2. – P. 219-226.
10. Long E.L. Means for Maintaining Permafrost Foundations. Pat. USA. #3, 217, 791, Cl. 165-45, 1964.
11. Nguyen – Chi H., Groll M. Entrainment or flooding limit in a closed two-phase thermosyphon // Proc. 4th Int. heat pipe conf. (London, Sept. 1981). – London. –1981. – P. 147-162.
12. Nguyen H., Groll M. The influence of wall roughness on the maximum performance of closed two – phase thermosyphons // 15th thermophys. conf. (Colorado, May 1980). – N80. – Colorado. – 1980. – P. 1503.

13. Obu J., Westermann S., Bartsch A., et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale // *Earth-Sci. Rev.* 2019. Vol. 193. P. 299–316.
14. Reay D.A. Heat – pipe cooling offers many advantages // *Electronic eng.* – 1972. – 44, N8. – P. 35-37.
15. Roberts C.C. A review of heat pipe liquid delivery concepts // *Proc. 4th Int. heat pipe conf.* (London, Sept. 1981). – London. – 1981. – P. 693-702.
16. Romanovsky V.E., Smith S.L., Christiansen H.H. Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the international polar year 2007–2009: a synthesis, *Permafrost Periglac // Process.* 2010. Vol. 21. P. 106–116.
17. Shiraishi M., Kikuchi K., Yamanichi T. Investigation of heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon // *Proc. 4th Int. heat pipe conf.* (London, Sept. 1981). – P. 95-104.
18. Valeri, E. Electrical discharge (explosions) in geotechnical engineering. / E. Valeri, T. Richter // XIII ECSMGE, Vaniček et al. (eds). ČGtS, Prague, Session 4 «Foundations in urban areas». Vol. 2, 2005. – p.413-418.
19. Wen Yaopu, Guo Shun. Experimental heat transfer performance of two-phase thermosyphons // *Proc. 5th Int. heat pipe conf.* (Tsukuba, May 1984). – Tsukuba, 1984. – Vol. 1. – P. 43-49.
20. Yee, K. Controlled Modulus Columns (CMC): A New Trend in Ground Improvement and Potential Applications to Indonesian Soils / K. Yee, R. A. Setiawan, O. Bechet, // ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement ISGI Brussels 31 May & 1 June 2012. – 2012.
21. Zhang, D.W. Fracturing mechanism in soils with three-dimension stress state / D.W. Zhang, S.Y. Liu // *Geotechnics of Waste Management and Remediation, ASE GeotechnicalC Special Publication.* – 2008. – Vol. 177. – P. 543-550.
22. Zornberg, J. Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil / J. Zornberg // *Geotechnique.* –2002. – Vol. 52(8). – P. 593-604.

23. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский // Изд-во «Наука», – М., 1976. – 278с.
24. Андреев Л.М. Определение величины теплового потока в кольцевом испарительном термосифоне при установившемся режиме // Тр. Николаев. – 1979. – № 150. – С. 66-69.
25. Андреев С.П. Исследование процессов кипения и конденсации в теплопередающем элементе // Инж. – физ. журн. – 1972. – 22, №6. – С. 999-1005.
26. Андреев С.П. Исследование теплообмена при фазовых превращениях жидкости в замкнутом канале // Теплоэнергетика. – 1972. – №7. – С. 88.
27. Аникин Г.В., Поденко Л.С., Вакулин А.А. Расчет динамики промерзания грунта вокруг вертикального парожидкостного термостабилизатора // Вестник Тюменского государственного университета. – 2008. – №6. – С. 42-49.
28. Анисимов О.А., Белолуцкая М.А., Лобанов В.А. Современные изменения климата и природной среды в области высоких широт Северного полушария // Метеорология и гидрология. 2003. № 1. С. 18–30.
29. Аскалонов, В.В. Цементно-грунтовые смеси для устройства фундаментов. /В.В, Аскалонов, Г.Б. Вайсфельд. - М.: БТП НИИ Горсельстроя, 1956.-54с.
30. Безродный М.К., Алексеенко Д. В. Влияние давления промежуточного теплоносителя на критические тепловые потоки в испарительных термосифонах // Изв. вузов. Энергетика. – 1977. – №4. – С. 80-84.
31. Безродный М.К., Алексеенко Д. В. Интенсивность теплообмена на участке кипения испарительных термосифонов // Теплоэнергетика. – 1977. – №7. – С. 83-85.
32. Безродный М.К., Беловиан А.И. К определению степени заполнения замкнутого термосифона низкотемпературными теплоносителями // Теплофизика и теплотехника. – 1975. – Вып. 29. – С. 126-129.

33. Безродный М.К., Сахацкий А.А. Исследование максимальных тепловых потоков в наклонных испарительных термосифонах с внутренними вставками // Изв. вузов. Энергетика. – 1979. – №4. – С. 110-112.
34. Безродный М.К., Файнзильберг С.Н., Беловиан А.И. Исследование кризиса теплопереноса в замкнутых двухфазных термосифонах // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1976. – №9. – С. 161-165.
35. Безродный М.К., Файнзильберг С.Н., Беловиан А.И., Колоскова Н.Ю. Влияние угла наклона замкнутого двухфазного термосифона на максимальную передающую способность термосифонах // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1976. – №11. – С. 174-177.
36. Блескина, Н.А. Глубинное закрепление грунтов синтетическими смолами. /Н.А. Блескина, Б.С. Федоров. - М.: Стройиздат., 1980. - 147с.
37. Блескина, Н.А. Глубинное закрепление грунтов синтетическими смолами. /Н.А. Блескина, Б.С. Федоров. - М.: Стройиздат., 1980. - 147с.
38. Блиер Б.М., Цинман М.М. А.с. 68155 (СССР). Способ замораживания грунта. – Оpubл. в БИ, 1945.
39. Болога М.К., Смирнов Г.Ф., Дидковский А.Б., Климов С.М. Теплообмен при кипении и конденсации в электрическом поле. – Кишинев: Штиинца. – 1987. – 240с.
40. Бондарев, П. Д. Деформации зданий в районе Воркуты, их причины и методы предотвращения / П. Д. Бондарев – М. : Из-во Академии архитектуры СССР, 1957. – 98 с.
41. Бугров, А.К. Опыт закрепления грунтов карбамидной смолой по добщественным зданием. / А.К. Бугров, Д.А. Кравченко. - «Строительства и архитектура Ленинграда». 1962. №9.
42. Бугров, А.К. Опыт закрепления грунтов карбамидной смолой под общественным зданием. / А.К. Бугров, Д.А. Кравченко. - «Строительства и архитектура Ленинграда». 1962. №9.
43. Быков, Н. И. Вечная мерлота и строительство на ней / Н. И. Быков, П. Н. Каптернев – М. : Трансжелдориздат,1940. – 372 с.

44. Вакулин А.А. Основы геокриологии. Учебное пособие. 2-ое изд. – Тюмень. – 2011. – 220с.
45. Васильев Л. Л., Вааз С. Л. Замораживание и нагрев грунта с помощью охлаждающих устройств / Под ред. Л. И. Колыхана. – Мн.: Наука и техника, 1986, 192 с.
46. Васильев Л.Л. Теплообменники на тепловых трубах. – Минск: Наука и техника, 1981. – 143с.
47. Васильев Л.Л., Киселев В.Г., Матвеев Ю.Н., Молодкин Ф.Ф. Теплообменники - утилизаторы на тепловых трубах / Под ред. Колыхана Л.И. – Минск: Наука и техника. – 1987. – 200с.
48. Вельчев, С.П. Особенности строительства нефтегазовых объектов на вечномёрзлых грунтах / С.П. Вельчев // Журнал нефтегазового строительства. – 2014. - № 2. - С. 34- 37.
49. Власов В.З., Леонтьев Н.Н. Балки, плиты, оболочки на упругом основании. - М.: Госиздат физико-математической литературы, 1960. – 492 с.
50. Войтковский К.Ф. Механические свойства льда. – М.: Издательство АН СССР, 1960.
51. Воронкевич, С.Д. Основы технической мелиорации грунтов. / С.Д. Воронкевич. - М.: Научный мир, 2005. 504 с.
52. Воронкевич, С.Д. Основы технической мелиорации грунтов. / С.Д. Воронкевич. - М.: Научный мир, 2005. 504 с.
53. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. – Новосибирск: Наука, 1975. – 175 с.
54. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
55. Вялов С.С., Александров Ю.А., Миренбург Ю.С., Федосеев Ю.Г. Искусственное охлаждение грунтов с помощью термосвай. – В сб.: «Инженерное мерзлотоведение», Москва, 1979.

56. Гаврилова М.К. Изменение климата в области вечной мерзлоты Евразии в XX столетии. /В сб.: Материалы Третьей конференции геокриологов России, т. 2. – М., Изд-во МГУ, 2005, с. 45-50.
57. Гагарин В.Г. Учет продольной фильтрации воздуха при оценке теплозащиты стен с вентилируемым фасадом / Козлов В.В., Садчиков А.В. Механцев И.А. // Промышленное и гражданское строительство. - 2005. -№6. - С.42-45.
58. Гапеев С.И. Рекомендуемые мероприятия и экспериментальные исследования по охлаждению многолетнемерзлых грунтов с целью их укрепления и повышения верхней границы залегания: Информационное письмо № 22. – Л.: Ленгипротранс, 1957.
59. Голли, А.В. Исследование сжимаемой толщи в связных грунтах под центрально нагруженными штампами: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Голли Александр Валентинович. – Л., 1972. – 20с.
60. Голли, А.В. Методика измерения напряжений и деформаций в грунтах / А.В. Голли // Учебное пособие. – Л.: ЛИСИ, 1984. 53с.
61. Головинцев, А.Г. Техническая термодинамика и теплопередача [Текст] / А.Г. Головинцев, Е.И. Федотов, Б.Н. Юдаев. - М.: Машиностроение, 1970. - 295 с.
62. Гончаров, Ю. М. Эффективные конструкции фундаментов на вечномерзлых грунтах / Ю. М. Гончаров. – Новосибирск: Наука, 1988. – 193 с.
63. Горелик Я.Б., Горелик Р.Я. Лабораторное исследование двухфазного естественно - конвективного охлаждающего устройства с горизонтальной испарительной частью // Криосфера Земли. – 2011. – Т.ХV. – №2. – С. 34-43.
64. Горелик Я.Б., Горелик Р.Я. Лабораторное исследование работы двухфазного естественно-конвективного охлаждающего устройства с горизонтальной испарительной частью. Криосфера Земли, 2011г., т. XV, №2, с. 34-43.
65. Горелик Я.Б., Колунин В.С. Физика и моделирование криогенных процессов в литосфере. – Новосибирск, изд. СО РАН. – 2002. – 317с.
66. ГОСТ 5180-2015. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Введ. 2016-01-04. – М. : Стандартинформ, 2016.

67. ГОСТ 20522-2012 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний (с Поправкой)».
68. ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация (с Поправкой)».
69. ГОСТ 5686-2020 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями (с Изменением N 1)». М.: Стандартиформ, 2020 год.
70. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата. – Метеорология и гидрология, 2004, №4, с 50-66.
71. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы: Пер. с англ. – М.: Энергия. – 1979. – 272с.
72. Дмитриев, Н.В. Обобщение результатов по химическому закреплению грунтов в основании зданий в Волгодонске / Н.В. Дмитриев // Основания, фундаменты и механика фунтов. – 1992. – №3.
73. Долгих Д.Г., Окунев С.Н., Поденко Л.С., Феклистов В.Н. Надежность, эффективность и управляемость систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений // Материалы международной конференции «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения». – Тюмень. – 2008. – С. 31.
74. Долгих Д.Г., Окунев С.Н., Поденко Л.С., Феклистов В.Н. Надежность, эффективность и управляемость систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений // Материалы международной конференции «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения». – Тюмень. – 2008. – С. 31.
75. Достовалов Б.Н., Кудрявцев В.А. Общее мерзлотоведение. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1967. – 444 с.
76. Дубина М.М. Прогноз и управление термомеханическим состоянием системы «сооружение-среда» в криолитозоне // Материалы международной конференции «Криосфера нефтегазоносных провинций». – Тюмень, 23-27 мая 2004. – С.56-57.

77. Елисеев В.Б., Сергеев Д.И., Что такое тепловая труба? – М.: Энергия. – 1971. – 136с.
78. Ершов Э.Д. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток/ Ершов Э.Д., Логинов В.Ф., Сычев К.И., Баулин В.В., Вартамян Г.С. и др. – М.: Недра, 1989. – 515 с.
79. Ершов Э.Д. Общая геокриология. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2002. – 682с.
80. Жайсамбаев Е.А., Краев А.Н., Краев А.Н., Воронцов В.В. Экспериментальный стенд для исследования процессов промерзания-оттаивания грунтов основания в лабораторных условиях // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №1, <https://t-s.today/PDF/16SATS120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/16SATS120.
81. Жинкин, Г.Н. Электрохимическое закрепление грунтов в строительстве /Г.Н. Жинкин. - Л.: Стройиздат, 1966. - 194 с.
82. Ибрагимов, М.Н. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов. Монография. / М.Н. Ибрагимов, В.В. Семкин. – М.: Издательство АСВ, 2012.
83. Ибрагимов, М.Н. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов. Монография. / М.Н. Ибрагимов, В.В. Семкин. – М.: Издательство АСВ, 2012.
84. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Чулков Б.А., Ягодкин И.В. Технологические основы тепловых труб. – М.: Атомиздат. – 1980. – 160с.
85. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Ягодкин И.В. Физические основы тепловых труб. – М.: Атомиздат. – 1978. – 256с.
86. Израэль Ю.А. Павлов А.В., Анохин Ю.А. Анализ современных и ожидаемых в будущем изменений климата и криолитозоны в северных регионах России. – Метеорология и гидрология, 1999, №3, с. 18-27.
87. Израэль Ю.А. Эволюция криолитозоны при современных изменениях глобального климата. – Метеорология и гидрология, 2002, №1, с. 22-34.
88. Интенсификация теплообмена: Успехи теплопередачи, 2/ Вилемас Ю.В., Воронин Г.И., Дзюбенко Б.В. и др.; Под ред. Жукаускаса А.А., Калинина Э.К., – Вильнюс: Мокслас. – 1988. – 188с.

89. Карлов В. Д. Сезоннопромерзающие грунты как основания сооружений: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1998.
90. Ким, М. В. Вопросы проектирования и устройства свайных фундаментов на вечномёрзлых грунтах / М. В. Ким. – Красноярск : Красноярское книжное изд-во, 1960. – 18 с.
91. Ким, М. В. Деформация сооружений на мерзлых наносах /М. В. Ким, Б. С. Павлов, К. Н. Ярцев. – Норильск, 1944. – 43 с.
92. Коленко Е.А., Вердиев М.Г. Использование термосифонов в термоэлектрическом приборостроении // Гелиотехника. – 1973. – №1. С. 10-12.
93. Корнилов Т.А. О некоторых ошибках проектирования и строительства малоэтажных домов из ЛСТК в условиях Крайнего Севера / Корнилов Т.А., Герасимов Г.Н. // Промышленное и гражданское строительство. - 2015. - №3. - С.42-46.
94. Кудрявцев В.А. Мерзлотоведение (краткий курс) / Кудрявцев В.А., Полтев Н.Ф., Романовский Н.Н., Кондратьева К.А., Меламед В.Г., Гарагуля Л.С. – М., Изд-во Моск. Ун-та, 1981. – 240 с.
95. Кулеев, М.Т. Глубинное закрепление грунтов в строительстве (учебное пособие). / М.Т. Кулеев. - Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1983. - 76с.
96. Кулеев, М.Т. Глубинное закрепление грунтов в строительстве (учебное пособие). / М.Т. Кулеев. - Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1983. - 76с.
97. Ломоносов, М.В. Слово о рождении металлов от трясения Земли [Текст] / М.В. Ломоносов. - В Санкт-Петербурге: Печатано при Императорской Академии наук, 1757г. - 32 с.
98. Лукин, Г. О. История развития фундаментостроения в Якутии / Г. О. Лукин // Фундаменты сооружений на мерзлых грунтах в Якутии. – М. : Наука, 1968. – С. 71–79.
99. Лукин, Г. О. История развития фундаментостроения в Якутии / Г. О. Лукин // Фундаменты сооружений на мерзлых грунтах в Якутии. – М. : Наука, 1968. – С. 71–79.

100. Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. – Новосибирск: Наука. – 1985. – 169с.
101. Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. – Новосибирск: Наука, 1985. – 169 с.
102. Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. – Новосибирск: Наука. – 1985. – 169с.
103. Макаров В.И. Управление температурным режимом мерзлых массивов в северном строительстве.- В кн.: Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств/ ИМ СО АН СССР. Якутск, 1983, с. 13-29.
104. Мардарский О.И., Кожухарь И.А., Болога М.К. Теплопередающие характеристики двухфазного электрогидродинамического термосифона // Теплообмен- VI: Материалы VI Всесоюз. конф. по теплообмену. – Минск. – 1980. – ч.2. – С. 100-104.
105. Мейстер Л.А. и Салтыков Н.И. К истории геокриологических исследований в СССР. – Сыктывкар: Коми книжное издательство, 1958. – 43 с.
106. Мельников В.П. Геокриологические последствия современных изменений глобального климата / Мельников В.П., Павлов А.В., Малкова Г.В. // География и природные ресурсы. - 2007. - № 3. - С. 19–27.
107. Мельников В.П., Мельникова А.А., Аникин Г.В., Иванов К.С., Спасенникова К.А. Инженерные решения в строительстве на вечной мерзлоте в плане повышения энергоэффективности сооружений // Криосфера Земли. 2014. – Т.ХVIII. – №3. – С.82-90.
108. Мельников, П. И. Мерзлотно-грунтовые условия строительства в Якутии / П. И. Мельников // Фундаменты сооружений на мерзлых грунтах в Якутии. – М. : Наука, 1968. – С. 5–15.
109. Мерзлотоведение и опыт строительства на вечномерзлых грунтах в США и Канаде/ С.С. Вялов, П.И. Мельников, Г.В. Порхаев и др. М: Стройиздат, 1968, 91 с.

110. Минкин, М.А. Основания и фундаменты сооружений на вечномёрзлых грунтах [Текст] / М.А. Минкин. - М.: ГАСИС, 2005. - 213 с.
111. Мулюков, Э.И. Отказы оснований и фундаментов зданий и их устранение химическим и конструктивным методом: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.02 / Мулюков Эдуард Инсафович. - Уфа, 1993. – 30 с.
112. Мусакаев Н.Г., Горелик Я.Б., Романюк С.Н. Аналитическое решение задачи теплового воздействия факела на многолетнемерзлые породы // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2013. – №5. – С.124-128.
113. Мусакаев Н.Г., Романюк С.Н., Бородин С.Л. Численное исследование закономерностей движения фронта фазового перехода в многолетнемерзлых породах // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2011. – №6. – С.124-130.
114. Неклюдов, В. С. Опыт устройства свайных фундаментов жилых зданий в г. Норильске / В. С. Неклюдов, Н. И. Нахотин, С. В. Сорокин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1978. – № 5. – С. 3–6.
115. Павлов А.В. Мерзлотно-климатические изменения на севере России: наблюдения, прогноз. – Известия РАН. География, 2003, №6, с. 39-50.
116. Павлов А.В. Прогноз температуры воздуха и грунтов в связи с оценкой надежности вечномёрзлых оснований сооружений / Павлов А.В., Хрусталева Л.Н., Микушина О.В. // Геоэкология. - 2005. - 3.-С.219-226.
117. Павлов А.В., Ананьева-Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование современных изменений температуры воздуха и мерзлых грунтов на севере России. / В сб.: Материалы Третьей конференции геокриологов России, т. 2. – М., Изд-во МГУ, 2005, с. 124-130.
118. Перлыштейн Г.З. Изменение криолитозоны в условиях современного потепления климата / Перлыштейн Г.З., Павлов А.В., Буйский А.А. // Геоэкология. - 2006. -№4. – С. 305-312.
119. Пиоро И.Л., Антоненко Ф.А., Пиоро Л.С. Эффективные теплообменники на основе двухфазных термосифонов. – Киев: Наукова думка. – 1991. – 222с.

120. Пособие по химическому закреплению грунтов инъекцией в промышленном и гражданском строительстве (к СНиП 3.02.01-86) / НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. - М.: Стройиздат, 1986. - 128 с.
121. Различные области применения холода / Под ред. Быкова А. В. – М.: Агропромиздат, 1985. 272 с.
122. Ржаницын, Б.А. Химическое закрепление грунтов в строительстве. / Б.А. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1986. – 264 с.
123. Ржаницын, Б.А. Химическое закрепление грунтов в строительстве. / Б.А. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1986. – 264 с.
124. Розенбаум Г.Е., Шполянская Н.А. Позднекайнозойская история криолитозоны Арктики и тенденции её будущего развития. – М.: Научный мир, 2000. 104 с.
125. РТМ 24.038.12-72. Руководящий технический материал по выбору упругих опор для трубопроводов тепловых и атомных электростанций. Министерство тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения: 1973. – 26 с.
126. Свод правил. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция : СНиП 2.02.04-88 : СП 25.13330.2020 : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2020 г. N 915/пр : введен в действие с 01.07.2021 г. – Москва, 2012. – 123 с.
127. Семена М.Г., Киселев Ю.Ф. Исследование при кипении в двухфазных термосифонах при пониженных давлениях насыщения и малых степенях заполнения зоны нагрева теплоносителем // Пром. энергетика. – 1985. – №8. – С. 50-52.
128. Семена М.Г., Киселев Ю.Ф. Исследование теплообмена в зоне теплоотвода двухфазных термосифонов при малых степенях заполнения // Инж. – физ. журн. – 1978. – 35, №4. – С. 600-605.
129. Сеницын А.Е. Обоснование строительства свайных фундаментов в пластично-мерзлых грунтах. – СПб: СПбГПУ, 2011. – 115 с.
130. Соколович, В.Е. Химическое закрепление грунтов. / В.Е. Соколович. - М.: Стройиздат, 1980.

131. Сорочан Е.А. Основания и фундаменты, подземные сооружения. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с.
132. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с изменением 1) / Росстандарт ФГУП Стандартинформ.- М.: 2016.
133. СП 24.13330.2021 «Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85». М.: Минстрой России, 2021 год.
134. Степанчук В.Ф., Стрельцов А.И. Анализ работы П-образного испарительного термосифона // Изв. вузов. Энергетика. – 1974. – №4. – С. 82-86.
135. Сумгин М.И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. – М.: Издательство АН СССР, 1937. – 385 с.
136. Сумгин М.И. и Демчинский Б.Н. Завоевание Севера (в области вечной мерзлоты). – М.: Издательство АН СССР, 1938. – 158 с.
137. Сумгин М.И., Качурин С.П., Толстихин Н.И., Тумель В.Ф. Общее мерзлотоведение. – М.: Издательство АН СССР, 1940. – 347 с.
138. Сумгин, М.И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. Издание 1-ое [Текст] / М.И. Сумгин. - Владивосток: Изд. дальневост. геофиз. обсерват. - 1927. – 381 с.
139. Тепловые трубы и теплообменники с использованием пористых материалов: Сб. науч. тр. / Под ред. Васильева Л.Л. – Минск: ИТМО АН БССР. – 1985. – 178с.
140. Тепловые трубы: Пер. с англ. и нем./ Под. Ред. Шпильрайна Э.Э. – М.: Мир. – 1972. – 421с.
141. Файнзильберг С.Н., Колоскова Н.Ю., Семена М.Г. К обобщению опытных данных по исследованию закономерностей предельных тепловых потоков двухфазных термосифонов // Изв. вузов. Энергетика. – 1978. – №6. – С. 86-88.
142. Федоров, Б.С. Усиление оснований буроинъекционными сваями / Б.С. Федоров, Х.А. Джантимиров // На стройках России. -1978. - №5 - С.2-5.
143. Фотиев С.М. Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты). Новосибирск, ГЕО, 2010, 279 с.

144. Хрусталева Л.Н., Гарагуля Л.С., Гордеева Г.И. Прогноз среднегодовой температуры воздуха на территории Республики Саха (Якутия) по результатам ретроспективного анализа // Криосфера Земли. – 2002. – Т. VI. – № 2. – С. 66-74.
145. Хрусталева Л.Н., Давыдова И.В. Прогноз потепления климата и его учет при оценке надежности оснований зданий на вечномерзлых грунтах // Криосфера Земли, – 2007. – Т. XI. – №2. – С.68-75.
146. Хрусталева Л.Н., Клименко В.В., Емельянова Л.В., Ершов Э.Д., Пармузин С.Ю., Микушина О.В., Терешин А.Г. Динамика температурного поля многолетнемерзлых пород южных районов криолитозоны при различных сценариях климатических изменений // Криосфера Земли. – 2008. – Т. XII. – №1. – С. 3-11.
147. Хрусталева Л.Н., Пустовойт Г.П. Вероятностно-статистические расчеты оснований зданий и сооружений в криолитозоне. – М.: Наука. – 1988. – 249с.
148. Хрусталева Л.Н., Чербунина М.Ю. Методика оценки надежности магистральных нефтепроводов // Криосфера Земли. – 2010. – Т. XIV. – №3. – С. 69-76.
149. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Высшая школа, 1973. – 448с.
150. Чи С. Тепловые трубы: Теория и практика / Пер. с англ. – М.: Машиностроение. – 1981. – 207с.
151. Чудинова С.М., Быховец С.С., Сороковиков В.А. и др. Особенности изменения температуры почв России в период последнего потепления климата. – Криосфера Земли, 2003, т. 7, №3, с. 23-30.
152. Шполянская Н.А. Глобальные изменения климата и эволюция криолитозоны. М., МГУ, географический факультет, 2008. – 131 с.
153. Эва В., Асакавичюс И., Гайгалис В. Низкотемпературные тепловые трубы. – Вильнюс: Мокслас. – 1982. – 184с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ЗАПАДНО-СИБИРСКАЯ КОМПАНИЯ»
629809, ЯНАО, Г. НОЯБРЬСК, ТЕРРИТОРИЯ ПРОМУЗЕЛ ПЕЛЕЙ, ПАНЕЛЬ XI
ИНН/КПП 8905062199/890501001 ОГРН 1168901052099
СРО №797 ОТ 05.09.2018Г



11.10.2024г. № 785-ЗСК/2024
на № _____ от _____

СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Жайсамбаева Еркна Аскеровича

Настоящей справкой подтверждается, что результаты диссертационного исследования Жайсамбаева Еркна Аскеровича, выполненные под научным руководством кандидата технических наук, доцента Краева А.Н. в рамках подготовки кандидатской диссертации на тему «Взаимодействие одиночной железобетонной сваи с термостабилизируемым основанием, представленным оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами», были использованы при расчете свайного фундамента на объекте: «Обустройство Чатлыкишского месторождения. Административно-бытовой и жилищный комплекс».

Внедрение результатов исследований позволило обеспечить требуемый уровень эксплуатационной безопасности объекта в сложных инженерно-геокриологических условиях криолитозоны, реализовать оптимальные проектные решения, снизить риски сверхнормативных осадок фундамента в условиях распространения оттаявших многолетнемерзлых грунтов, обеспечить сокращение продолжительности и стоимости строительства нулевого цикла объекта.

Достоверность принятых решений подтверждена геотехническим мониторингом, проведенным в ходе строительства, а также в период дальнейшей эксплуатации объекта.

С уважением,
Генеральный директор



И.И. Самигуллин

✉ INFO@ZSK.OOO

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
**ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ОБЪЕДИНЕНИЕ «ГЕОКРИОТЕХНИК»**

ИНН 8901042138 КПП 890101001 ОГРН 1238900002648

РАСЧЕТНЫЙ СЧЕТ 40702810867400005927

БАНК ПОЛУЧАТЕЛЯ:

ЗАПАДНО-СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ №8647 ПАО

СВЕРБАНК

БИК 047102651 К/СЧ 30101810800000000651

 ЮРИДИЧЕСКИЙ И ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:
 629008, РФ, ЯМАЛО-НЕНЕЦКИЙ АО, г. САЛЕХАРД,
 ул. РЕСПУБЛИКИ, д.100-Б, пом.11

Тел. +7-922-277-77-57

E-mail: geocryotechnics@yandex.ru
 От 11.05.2025г. № _____
 На № _____
Акт о внедрении

результатов научно-исследовательской работы,
 выполненной экс-аспирантом кафедры «Строительного производства и геотехники»
 ФГБОУ ВО Тюменский индустриальный университет
 Жайсамбаевым Еркном Аскеровичем

При эксплуатации жилого дома, расположенного в селе Аксарка по улице Новая д. 18а, произошло растепление многолетнемерзлого грунтового основания с образованием чаши оттаивания. Данный процесс вызвал развитие неравномерных сверхнормативных деформаций основания фундаментов, выразившихся в отклонении остова здания от вертикали. Для дальнейшей безаварийной эксплуатации здания была применена методика оценки и прогноза осадки одиночной сваи, разработанная автором в диссертационной работе, основанная на термостабилизации оттаявшего грунтового основания с образованием мерзлого грунтового уширения (ядра) вокруг сваи.

Объект был приведен в нормативное техническое состояние.

С Уважением, генеральный директор



_____ Петров Э.А.