

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «СТРОИТЕЛЬСТВО»
(АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»))

На правах рукописи



Зорин Дмитрий Васильевич

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ БУРОВЫХ СВАЙ
В ИСКУССТВЕННО ЗАСОЛЕННЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ**

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Алексеев Андрей Григорьевич



Москва – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	13
1.1. Особенности устройства свай в многолетнемерзлых грунтах.....	14
1.2. Опыт применения буровых свай в криолитозоне.....	15
1.3. Твердение растворов на мерзлых грунтах	20
1.4. Теплообмен между материалом сваи и многолетнемерзлым грунтом	25
1.5. Массообмен между материалом сваи и многолетнемерзлым грунтом.....	30
1.5.1. Процесс массообмена и его интенсивность при устройстве свай.....	30
1.5.2. Влияние степени засоленности на прочность мерзлых грунтов	37
1.5.3. Расчет буровых свай в многолетнемерзлых грунтах.....	41
Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования	50
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	50
2.1. Методы лабораторных исследований.....	51
2.2. Методы полевых исследований	58
2.3. Обработка и анализ результатов исследований.....	63
Выводы по главе 2	71
ГЛАВА 3. СОПРОТИВЛЕНИЕ СДВИГУ ИСКУССТВЕННО ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ	70
3.1. Определение сопротивления сдвигу мерзлых грунтов.....	71
3.2. Статистическая обработка результатов испытаний	82
3.3. Определение несущей способности фрагментов буровых свай	82
Выводы по главе 3	89
ГЛАВА 4. ТЕПЛОМАССООБМЕН МЕЖДУ МАТЕРИАЛОМ СВАИ И МЕРЗЛЫМ ГРУНТОМ.....	91
4.1. Определение температуры и степени засоленности грунтов.....	92
4.2. Численное моделирование теплового взаимодействия буровых свай различных диаметров с многолетнемерзлым грунтом	102
4.3. Зависимость степени засоленности грунта вокруг сваи от времени.....	108

Выводы по главе 4	112
ГЛАВА 5. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ БУРОВЫХ СВАЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК, В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОМ ГРУНТЕ.....	114
5.1. Усовершенствованная методика расчета несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах	115
5.2. Аprobация усовершенствованной методики	117
5.3. Способ устройства буровой сваи в многолетнемерзлом грунте, исключающий массообмен между бетоном и грунтом	120
Выводы по главе 5	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	127
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ	149

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Наиболее широко зарекомендовавшими себя способами устройства свайных фундаментов в криолитозоне являются буроопускной, бурозабивной и опускной. Данные виды свай или способы их погружения имеют ряд преимуществ, но и свои недостатки, связанные с использованием элементов заводской готовности. Предварительное изготовление металлических труб или железобетонных свай на заводе, использование при их погружении специальной техники, а также транспортировка в связи с недостаточной развитостью транспортной инфраструктуры районов Крайнего Севера и Дальнего Востока зачастую существенно увеличивают стоимость возведения фундамента.

Отличительной особенностью буровых свай является вариативность их устройства, а основное преимущество, по сравнению со сваями, используемыми в криолитозоне, заключается в том, что свая образуется путем заполнения пробуренной скважины раствором без использования готовых элементов. Обеспечение набора прочности раствора в условиях отрицательных температур основания достигается методом термоса, электро- или паропрогрева, а также путем использования химических добавок.

Актуальность выполненных исследований обусловлена отсутствием достоверной методики определения несущей способности буровых свай, изготовленных с применением химических добавок, в многолетнемерзлых грунтах.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами устройства свайных фундаментов занимались следующие советские и российские ученые: Аббасов П.А., Абжалимов Р.Ш., Бахолдин Б.В., Безволев С.Г., Березанцев В.Г., Герсеванов Н.М., Готман А.Л., Готман Н.З., Далматов Б.И., Джантимиров Х.А., Дзагов А.М., Ермошин П.М., Знаменский В.В., Ильичев В.А., Колыбин И.В., Мангушев Р.А., Петрухин В.П., Попсуенко И.К., Пронозин Я.А., Работников А.И., Разводовский Д.Е., Сумгин М.И., Ухов С.Б., Федоровский В.Г., Цытович Н.А., Шейнин В.И., Шулятьев О.А., Ястребов П.И.,

в том числе на многолетнемерзлых грунтах: Аксенов В.И., Алексеев А.Г., Бакшеев Д.С., Бандос А.П., Бояринцев А.В., Велли Ю.Я., Воробьев М.С., Вялов С.С., Герасимов А.С., Гольдштейн М.Н., Гончаров Ю.М., Городецкий С.Э., Гохман М.Р., Докучаев В.В., Зарецкий Ю.К., Конаш В.Е., Кутвицкая Н.Б., Миренбург Ю.С., Набережный А.Д., Неклюдов В.С., Пекарская Н.К., Порхаев Г.В., Садовский А.В., Таргулян Ю.О., Тихомиров С.Н., Хрусталеv Л.Н. и др.

Проблемам использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований фундаментов посвящены работы многих зарубежных исследователей: Aldaeef A.A., Andersland O.B., Anderson D.M., Biggar K.W., Dourado J.B.O.L., Fish A.M., Fleming K., Gao Q., Harris S.A., Hass H., Heydinger A.G., Hivon E.G., Johnston G.H., Kay B.D., Lade P.V., Li J.C., Linell K.A., Liu J.K., Nguyen A.D., Nixon J.F., Rayhani M.T., Sego D.C., Shi R., Skempton A.W., Wen Z.

Близкими к теме диссертации являются работы следующих отечественных исследователей: Березовский Б.И., Бугрим С.Ф., Гончаров А.А., Гохман М.Н., Дзагов А.М., Жуков В.Ф., Комаров А.К., Коронов П.В., Курушин А.Д., Лукина Ф.Х., Максимов Г.Н., Матвеева О.И., Неклюдов В.С., Петров А.В., Полуэктоv В.Е., Федорович Д.И., Цеева А.Н., Щегольков Ю.Г., Юрко Ю.П.

Существует несколько методических документов, таких как «Рекомендации по технологии устройства и теплотехническим расчетам буронабивных и комбинированных свай в вечномерзлых грунтах» ВНИИОСП Госстроя СССР [104], «Рекомендации по устройству буронабивных свай в вечномерзлых грунтах» Института мерзлотоведения СО РАН [105], «Инструкция по проектированию и устройству буронабивных свай-стоек в вечномерзлых грунтах района Норильска» Минцветмета СССР [43]. В них рассмотрены различные методы устройства буронабивных свай в многолетнемерзлых грунтах, включая метод термоса, электро- и паропрогрева, использования химических добавок и комбинации этих методов. При этом в основном предполагается использование свай-стоек в многолетнемерзлых грунтах по принципу II, с допущением оттаивания.

Настоящее исследование посвящено изучению взаимодействия буровых свай, изготовленных с применением химических добавок, с многолетнемерзлым грунтом, используемым по принципу I, в мерзлом состоянии.

Несмотря на изучение многих вопросов, возникающих при устройстве буровых свай в мерзлом грунте, в настоящее время существует ряд ограничений в их использовании. Считается, что использование добавок существенным образом снижает несущую способность свай вследствие возникающего массообмена с многолетнемерзлым грунтом. Свод правил СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» [13] не рекомендует использование буровых свай и не содержит требования по их проектированию.

В настоящий момент отсутствует достоверная методика определения несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах. Отсутствуют рекомендации по определению времени замерзания их основания после их устройства. Ограничены представления о механизме снижения прочностных свойств основания. Не разработаны способы устройства буровых свай, предотвращающие засоление основания.

Результаты большинства исследований специалистов в области оснований и фундаментов, механики грунтов и материаловедения на сегодняшний день сильно разрознены и не имеют четкой взаимосвязи между собой, поэтому внедрение буровых свай, изготовленных с применением химических добавок, в практику строительства в криолитозоне затруднено.

Целью диссертационной работы является совершенствование методики определения несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах.

Для достижения цели сформулированы основные **задачи исследования**:

- выполнить аналитический обзор научно-технической, методической и нормативной литературы, затрагивающей вопросы теплообмена и массообмена между бетоном буровых свай, изготовленных с применением химических добавок, и многолетнемерзлым грунтом, а также методы расчета несущей способности и способы их устройства;

- провести комплексные лабораторные исследования по выявлению механизмов и закономерностей изменения степени засоленности и предельно длительного сопротивления сдвигу мерзлых грунтов при устройстве буровых свай при различных температурах основания;
- выполнить расчетно-теоретическое исследование времени замерзания и степени засоленности грунтов основания буровой сваи после ее устройства;
- усовершенствовать методику определения несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах;
- апробировать методику путем сравнения расчетных значений со значениями, полученными по результатам статических испытаний натурных свай.

Объектом исследования являются многолетнемерзлые глинистые и песчаные грунты, искусственно засоленные вследствие массообмена между раствором и грунтом при устройстве буровых свай.

Предметом исследования является несущая способность буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах.

Научная новизна диссертационной работы

1. Получены и научно обоснованы закономерности изменения времени замерзания грунтов основания буровых свай различных диаметров после их устройства, а также степени засоленности и предельно длительного сопротивления сдвигу мерзлых глинистых и песчаных грунтов во времени.
2. Предложен новый способ подготовки образцов для определения сопротивления сдвигу искусственно засоленных грунтов, включающий заливку цементного раствора положительной температуры, изготовленного с применением химической добавки, на мерзлый грунт как с использованием гидроизолирующего материала, так и без него.
3. Усовершенствована методика определения несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах, позволяющая повысить достоверность расчета на 40 %.

4. Экспериментально доказана перспективность использования в практике гидроизоляционного покрытия стенок скважины при устройстве буровых свай, исключающего массообмен между бетоном и грунтом.

Теоретическая значимость работы

1. Развита представления о механизме и закономерностях изменения степени засоленности и прочностных свойств многолетнемерзлых грунтов основания буровых свай, изготовленных с применением химических добавок.
2. Установлена зависимость сопротивления сдвигу искусственно засоленных многолетнемерзлых глинистых и песчаных грунтов от температуры с помощью разработанного автором способа подготовки образцов и стандартных методов лабораторного определения свойств грунтов.
3. Получена нелинейная многофакторная зависимость времени замерзания основания буровой сваи после устройства от ее диаметра, начальной температуры и теплофизических свойств грунтов с использованием регрессионного анализа результатов численных теплотехнических расчетов.
4. Выполнен сравнительный анализ зависимостей температуры и степени засоленности грунтов от расстояния до сваи и времени, полученных экспериментальным и расчетным путем.

Практическая значимость работы

1. Усовершенствованная методика определения несущей способности апробирована на основе результатов статических испытаний буронабивных свай, изготовленных с применением комплексной химической добавки в многолетнемерзлых грунтах, на опытной площадке.
2. Определены частные значения коэффициента условий работы буровой сваи, изготовленной с применением выбранной комплексной химической добавки, в многолетнемерзлом грунте, которые могут использоваться в практике при расчете несущей способности.
3. Разработана методика предварительной оценки времени замерзания оснований, оттаявших в процессе устройства свай различных диаметров, от начальной температуры и теплофизических свойств многолетнемерзлых

грунтов, которую возможно использовать в этапе проработки конструктивных решений при проектировании фундаментов.

4. Разработан способ, обеспечивающий набор прочности бетона без электропрогрева и исключающий возможность массообмена между бетоном и грунтом при устройстве буронабивной сваи в многолетнемерзлом грунте.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач использовались метод частных коэффициентов надежности, теория прочности Кулона — Мора, принципы использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований фундаментов, модель взаимодействия бетона с окружающим многолетнемерзлым грунтом, метод конечных разностей для решения задачи теплопереноса, а также стандартные методы испытания грунтов со статистической обработкой и анализом результатов.

В экспериментальных исследованиях использовались образцы мерзлых грунтов, фрагменты свай и натурные буронабивные сваи в многолетнемерзлых грунтах, высокотехнологичные средства измерения и сбора информации.

Для теоретического и графического анализа результатов испытаний и численных расчетов теплового взаимодействия свай с мерзлым грунтом использовались отечественные и зарубежные компьютерные программы.

Личный вклад автора

Автором самостоятельно обобщено и проанализировано доступное множество литературных источников по опыту использования буровых свай, изготовленных с применением химических добавок, в многолетнемерзлых грунтах, теоретических и экспериментальных данных по тепломассообмену между раствором и грунтом, происходящему при устройстве свай, а также данных по влиянию степени засоленности грунтов на их прочностные свойства.

При консультациях научного руководителя сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Автором самостоятельно разработана методология экспериментальных исследований, в том числе оригинальный способ подготовки образцов, проведен комплекс экспериментальных и расчетно-теоретических исследований.

Выполнен патентно-информационный поиск и запатентован способ устройства буронабивной сваи в многолетнемерзлом грунте, исключающий возможность массообмена с грунтом.

Усовершенствована и апробирована методика определения несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах, определены частные значения коэффициента условий работы, разработана методика предварительной оценки времени замерзания их оснований.

Автором самостоятельно написаны все главы диссертационной работы, а также соответствующие части статей и тезисы докладов по выполненной работе.

Положения, выносимые на защиту

В соответствии с поставленными задачами автор выносит на защиту следующие основные результаты работы.

1. Закономерности изменения времени замерзания оснований буровых свай различных диаметров после их устройства, а также степени засоленности и сопротивления сдвигу мерзлых глинистых и песчаных грунтов во времени.
2. Усовершенствованная методика определения несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах и частные значения коэффициента условий работы.
3. Методика предварительной оценки времени замерзания оснований, оттаявших в процессе устройства свай различных диаметров, от начальной температуры и теплофизических свойств многолетнемерзлых грунтов.
4. Способ, обеспечивающий набор прочности бетона и исключающий возможность массообмена между бетоном и грунтом при устройстве буронабивной сваи в многолетнемерзлом грунте.

Степень достоверности результатов

Представления о механизме и закономерностях массообмена между многолетнемерзлым грунтом и раствором буровых свай, изготовленных с применением химических добавок, подтверждены результатами аналитического обзора, результатами лабораторных и полевых экспериментальных и расчетно-теоретических исследований.

Степень достоверности результатов проведенных исследований predetermined использованием классических методов расчета, принятых в механике мерзлых грунтов, и статистической обработкой результатов испытаний.

В рамках экспериментальных исследований использованы апробированные приборы и оборудование, подвергаемые систематической поверке. Компьютерные программы имеют сертификаты соответствия действующим нормам.

Для сопоставления и обеспечения воспроизводимости результатов всего комплекса лабораторных и полевых испытаний использован единый состав комплексной химической добавки.

Апробация работы

Результаты работы доложены на XXI Международной научной конференции «Строительство — формирование среды жизнедеятельности» (г. Москва, 2018 г.); на Международном геотехническом симпозиуме «Геотехника строительства промышленных и транспортных сооружений Азиатско-Тихоокеанского региона» (г. Южно-Сахалинск, 2018 г.); на Международной научно-практической конференции «Современные технологии проектирования и строительства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах» (г. Москва, 2018 г.); на строительной секции в Центральном доме ученых с докладом на тему: «Взаимодействие буровых свай, затворенных с применением химических добавок, в многолетнемерзлом грунте, используемом по принципу I» (г. Москва, 2021 г.); на IV Международной научно-практической конференции «Современные технологии инженерных изысканий, проектирования и строительства на многолетнемерзлых грунтах» (г. Москва, 2021 г.); на Международном строительном форуме «Арктика» (г. Москва, 2022 г.); на 12-м Международном симпозиуме по инженерному мерзлотоведению (г. Ланьчжоу, 2024 г.).

Внедрение результатов исследования осуществлено при разработке технических решений по устройству свайных фундаментов на нескольких объектах горнодобывающей промышленности, а также при изменении раздела 6 СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых

грунтах» и разработке СП 496.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Правила производства работ».

Публикации

По материалам исследований опубликованы 9 научных работ по теме диссертации, из них 4 статьи в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий по списку ВАК РФ, 2 статьи, индексируемые в международных базах данных Web of Science и Scopus, и 2 статьи в периодических изданиях. Получено 1 патентное свидетельство.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 174 наименований (в том числе 45 зарубежных). Общий объем диссертации 152 страницы, содержит 63 рисунка, 21 таблицу.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения по п. 1 в части разработанного автором способа подготовки образцов; по п. 5 в части усовершенствованной методики расчета несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах, полученных частных значений коэффициента условий работы свай и рекомендаций по определению времени замерзания оснований свай; по п. 15 в части проведенных экспериментальных исследований.

Работа выполнялась в Научно-исследовательском, проектно-изыскательском и конструкторско-технологическом институте оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсевича (НИИОСП им. Н.М. Герсевича) — структурное подразделение АО «НИЦ «Строительство».

Автор выражает благодарность научному руководителю, заместителю генерального директора по научной работе АО «НИЦ «Строительство», д.т.н., члену Российской инженерной академии, доценту **Алексееву А.Г.**, а также коллективу лаборатории «Механики мерзлых грунтов и расчета оснований» № 8 НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство» за помощь, оказанную при разработке диссертационной работы.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Хозяйственное основание криолитозоны в нашей стране началось с 20-х годов прошлого века, вместе с этим возникла необходимость в разработке специальных подходов при возведении фундаментов зданий и сооружений на основаниях, сложенных многолетнемерзлыми грунтами. Эта необходимость связана со структурной неустойчивостью мерзлых грунтов при тепловом воздействии на них.

Мерзлые грунты вследствие наличия льдо-цементных связей отличаются от грунтов немерзлых высокими прочностными и деформационными свойствами. Однако при оттаивании льдо-цементные связи разрушаются, что приводит к значительному снижению механических свойств грунтов и, зачастую, к недопустимым деформациям оснований.

В 1928 году Цытович Н.А., впоследствии ставший основоположником инженерного мерзлотоведения, опубликовал монографию [122], в которой предложил два основных принципа строительства сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Принцип I — сохранение мерзлого состояния оснований и принцип II — искусственное предварительное оттаивание мерзлых пород или допущение их оттаивания.

Цытович Н.А. [124] впоследствии разработал и обосновал расчетами способ строительства сооружений на многолетнемерзлых грунтах с проветриваемым (вентилируемым) подпольем, позволяющим предотвратить оттаивание оснований на весь период эксплуатации. Этот способ на сегодняшний день является наиболее распространенным и во многом предопределил дальнейшее развитие способов устройства оснований и фундаментов в криолитозоне. Широко стали применяться свайные фундаменты, которые в данном случае позволяют не только передать нагрузку от сооружения на большую глубину, на более прочные и неподверженные тепловому воздействию грунты, но и с легкостью приподнять здание над поверхностью земли.

1.1. Особенности устройства свай в многолетнемерзлых грунтах

В настоящее время свайные фундаменты на многолетнемерзлых грунтах используются в более 75 % случаев. В соответствии с СП 25.13330.2020 [13] различают следующие способы устройства свай: буроопускной, опускной, бурозабивной, бурообсадной способы, а также винтовые сваи, погружаемые завинчиванием.

Наиболее распространенным сегодня способом устройства свайных фундаментов на многолетнемерзлых грунтах, используемых по принципу I, является буроопускной. Буроопускные сваи имеют ряд преимуществ и недостатков. К преимуществам буроопускных свай относится прежде всего изученность данного способа и применимость практически в любых геокриологических условиях [122]. Однако процесс их устройства достаточно трудоемкий, содержащий следующие операции: бурение и заполнение раствором до поверхности кровли многолетнемерзлого грунта скважины, диаметр которой превышает не менее чем на 50–100 мм размер поперечного сечения сваи, погружение сваи в скважину, заполнение внутренней полости сваи раствором (при устройстве свай из стальных труб), заполнение пазух сухим непучинистым песком в пределах слоя сезонного оттаивания.

Бурозабивные и опускные сваи используются значительно реже и при этом имеют тот же недостаток: трудоемкость производства работ. При бурозабивном и опускном способах сваи погружаются в грунт забивкой в предварительно пробуренные скважины или вдавливанием в предварительно оттаянные скважины соответственно. Область применения бурозабивного способа ограничивается высокотемпературными многолетнемерзлыми породами (при температуре выше минус 0,3 °С — минус 1,2 °С в зависимости от типа грунта), а опускных — низкотемпературными (при температуре ниже минус 2 °С) [18], что связано с сильным температурным воздействием на них в процессе предварительного оттаивания столбов грунта перед погружением свай.

Не трудно заметить, что жесткость и прочность всех перечисленных видов свай обеспечивается за счет использования элементов заводской готовности: железобетонных свай или металлических труб, доставка которых на строительные площадки в некоторых случаях сильно увеличивает стоимость фундаментов. Сваи же буровые, к которым относятся буронабивные, буроинъекционные и т. д. [12], в мерзлых грунтах практически не применяются. В основном это связано с необходимостью набора прочности бетона (материала ствола свай), которая значительно осложняется в связи с отрицательными температурами вмещающих сваю пород.

Действующие нормы [13] ограничивают возможность применения буровых свай в криолитозоне. Для их применения установлено требование по обязательному проведению, до принятия решения об их использовании, научно-исследовательских работ, включающих экспериментальные полевые и лабораторные исследования, а также теплотехнический расчет. В рамках работ требуется изготавливать опытные сваи, в которых контролировать набор прочности бетона, уложенного в распор с мерзлым грунтом, определять экспериментальным путем сопротивление мерзлого грунта сдвигу на контакте с бетоном, определять температуру по длине свай и ее сплошность, а также проводить испытания свай на вдавливающие, выдергивающие и горизонтальные нагрузки.

1.2. Опыт применения буровых свай в криолитозоне

В настоящее время буровые сваи широко применяются в условиях умеренного климата при строительстве крупных промышленных объектов и транспортных сооружений, при возведении зданий повышенной этажности, а также в условиях стесненной городской застройки. Возможность устройства буровых свай в многолетнемерзлых грунтах, наряду с использованием буроопускных свай, всегда интересовала исследователей и строителей северных городов. Об интересе свидетельствует большое количество руководств,

методических рекомендаций [43, 44, 103-105, 107] и статей [69, 72, 74, 77, 79], в том числе опубликованных за последние 10–15 лет [58, 66, 82, 88, 101, 108]. Однако вопрос о возможности использования буровых свай в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, как отмечено выше, все еще остается открытым.

Вопросами устройства буронабивных свай в криолитозоне, начиная еще с 1960-х годов, занимались Березовский Б.И. [30], Жуков В.Ф. и Максимов Г.Н. [59], Полуэктов В.Е. [97], Щегольков Ю.Г. [129] и др. в Северном отделении НИИОСП, НИИЖБ, Институте мерзлотоведения СО РАН, в Якутском отделении Красноярского ПСНИИП. С использованием буронабивных свай в качестве фундаментов (в основном по принципу II) стали возводиться различные промышленные и гражданские здания и сооружения в районах Воркуты, Норильска, Якутска и Мирного, а также объекты транспортного назначения на трассе БАМ.

В 1951 г. в г. Норильске впервые осуществлено бетонирование фундаментов в распор с мерзлым грунтом, которое имело положительный результат. Это послужило основанием для применения этого способа на строительстве ряда крупных зданий и сооружений [79]. Фундамент железобетонной трубы высотой 150 м агломерационной машины на никелевом заводе выполнен из буронабивных свай-стоек длиной 27 м. Здание драматического театра построено на сборно-монолитных «висячих» буронабивных сваях (Рисунок 1.1).

В 1975–1977 гг. успешно возведены: мост на 160-м км участка трассы Байкало-Амурской железнодорожной магистрали «БАМ — Тында» и мост на 1714-м км Чарского направления трассы БАМ. Фундаменты мостов выполнены из буронабивных свай. В середине 1980-х годов на буронабивных сваях построен ряд объектов в г. Усть-Илимске, а также на Богучанской ГЭС [69].

В настоящее время в Якутске с применением буронабивных свай с подбором состава бетонов, в зависимости от грунтовых условий, температуры, сроков производства работ, построено более 30 объектов [24]. В квартале 46 г. Якутска, геокриологические условия которого характеризуется наличием глубоких таликовых зон, на буронабивных сваях были построены административное здание

и жилой дом с магазином и офисом по ул. Дзержинского, 23 (Рисунок 1.2). Буронабивные сваи запроектированы диаметром 500 и 800 мм с заглублением в грунты на 8 ... 14,5 м. По данным геотехнического мониторинга, в период с 2005 по 2010 гг. максимальное значение осадок составило 2,8 мм.



Рисунок 1.1 – Здание Норильского Заполярного театра драмы им. В.В. Маяковского



Рисунок 1.2 – Здание по адресу: г. Якутск, ул. Дзержинского, 23, построенное на буронабивных сваях

Об актуальности вопроса также свидетельствует и зарубежный опыт. По данным Костиненко Г.И. [73], с 60–70-х годов прошлого века буронабивные сваи стали применяться в районах распространения многолетнемерзлых грунтов на территориях США и Канады. Например, фундаменты под ветрогенераторы научно-исследовательской базы Scott Base в Антарктиде [88] (Рисунок 1.3) возведены с использованием буроинъекционных микросвай.



Рисунок 1.3 – Ветрогенераторы базы Scott Base в Антарктиде [88]

Анкерные опоры защитных сооружений от лавин в швейцарских Альпах [165] (Рисунок 1.4), равно как и в России, на горнометаллургическом комбинате Удокан, также изготовлены с использованием трубчатых винтовых штанг в многолетнемерзлых грунтах.



Рисунок 1.4 – Защитные сооружения от лавин в швейцарских Альпах [165]

В 2017 г. специалистами НИИОСП им. Н.М. Герсегова при участии автора выполнено обследование технического состояния фундаментов недостроенной мебельной фабрики в районе Кайеркан города Норильска (Рисунок 1.5). Фундамент фабрики выполнен из буроопускных и буронабивных свай-стоек.



Рисунок 1.5 – Буронабивные сваи на недостроенной фабрике в Кайеркане

Анализ существующих примеров использования буровых свай в многолетнемерзлых грунтах показывает, что в советское время изучению возможности и технологий их устройства посвящалось большое количество работ. Полученные в результате исследований данные свидетельствовали, что в определенных мерзлотно-грунтовых условиях использование таких свай целесообразно и экономически эффективно.

Одной из наиболее важных задач при устройстве буровых свай в условиях отрицательных температур вмещающих пород является обеспечение набора прочности бетона в скважинах.

1.3. Твердение растворов на мерзлых грунтах

Большинство работ, направленных на изучение буронабивных свай в многолетнемерзлых грунтах, выполнено специалистами по строительному материаловедению, разработаны руководства и методические рекомендации по бетонированию фундаментов в криолитозоне [44, 103, 107].

Большое внимание в данных документах уделялось обеспечению набора прочности бетонов при отрицательных температурах различными способами:

- способом термоса;
- способом введения в бетонную смесь химических добавок;
- электропрогревом бетона;
- комбинированными способами, сочетающими несколько из перечисленных выше.

Способ термоса используется в многолетнемерзлых грунтах, имеющих температуру не выше минус 3 °С, с обязательным устройством теплоизоляции, минимизирующей оттаивание основания в процессе бетонирования. Способ применим в основном для конструкций фундаментов мелкого заложения, когда присутствует возможность устройства теплоизолирующего слоя под подошвой фундамента. В случае свайных фундаментов возможна лишь теплоизоляция оголовка сваи.

Электропрогрев бетона применяется в случае необходимости набора прочности бетоном в короткие сроки, однако сопряжен с внесением в основание значительного количества тепла, которое увеличивается вследствие тепловыделения в процессе гидратации. Данный способ эффективен и применяется при использовании многолетнемерзлых грунтов по принципу II с допущением их оттаивания или предпостроечным оттаиванием, по принципу I практически не применяется, так как электропрогрев приводит к значительному оттаиванию мерзлых пород и увеличению сроков вмерзания свай до неприемлемого для сроков строительства времени.

При устройстве свай с применением специальных химических добавок обеспечивается требуемый набор прочности бетона и минимизируется количество тепла, вносимого в мерзлое основание. Используются комплексные составы добавок, включающие противоморозные, пластифицирующие компоненты и ускорители твердения. Данный способ, по мнению автора, допустимо применять при использовании многолетнемерзлых оснований по принципу I.

Кинетика твердения бетонов, изготовленных с применением химических добавок и уложенных в распор с многолетнемерзлым грунтом, изучена достаточно хорошо. Предложено большое количество как моно-, так и полифункциональных добавок, позволяющих обеспечить набор прочности, повысить пластичность и удобоукладываемость смеси [43, 100, 104, 105].

Наиболее важным компонентом комплексных добавок при устройстве свай в многолетнемерзлом грунте является противоморозный. В качестве противоморозных добавок чаще всего используются различные соли: хлорид кальция (ХК), нитрат натрия (НН), нитрит кальция (НК), формиат натрия (ФН) и другие. Значение противоморозных компонентов заключается в необходимости поддержания жидкой фазы в растворе при отрицательных температурах для обеспечения твердения.

Рекомендации по устройству буронабивных свай в вечномерзлых грунтах [105] устанавливают следующую динамику нарастания прочности бетона для буронабивных свай диаметром 600 мм и более (Таблица 1.1).

Введение в смеси пластифицирующих компонентов (С-3 или других) позволяет снизить водоцементное отношение (В/Ц) до 0,4 при этом достигнув увеличения прочности.

Количество безводных солей комплексных добавок определяется в процентах от массы цемента и обычно не превышает 3 %. Несмотря на то, что данные таблицы свидетельствуют о возможности набора прочности раствором в условиях отрицательных температур мерзлых грунтов, опубликованные рекомендации и руководства не содержат рекомендаций по расчету требуемого количества добавок.

Таблица 1.1 – Прочность бетона (в % от марочной) в зависимости от условий твердения для составов, затворенных с применением различных комплексных добавок [105]

Добавки [103]

Тип добавки	Температура грунта, °С					
	от 0 до минус 2			от минус 2 до минус 5		
	Срок выдерживания, сут					
	7	28	90	7	28	90
(С-3) + СНВ	60	80	100	—	—	—
ЛСТ + СНВ	50	70	90	—	—	—
ХК + (С-3)	80	90	100	70	90	100
ХК + ЛСТ	70	90	100	60	90	100
НН + (С-3)	65	85	100	60	80	100
НН + ЛСТ	60	75	100	50	70	90
НК + (С-3)	70	90	100	70	90	100
НК + ЛСТ	65	85	100	60	80	100
ХК + НН + ЛСТ	75	90	100	60	80	100
ХК + НН + (С-3)	90	100	110	80	90	100
Примечание: (С-3) — разжижитель С-3; ЛСТ — литосульфаты технические; СНВ — смола нейтрализованная, воздухововлекающая.						

В начале 2000-х годов ЯкутПНИИС выполнен большой комплекс исследований по изучению кинетики твердения бетонов с различными комплексными химическими добавками в контакте с многолетнемерзлыми грунтами при температуре минус 4,5 °С в подземной лаборатории. В 2001–2002 гг. был реализован натурный эксперимент по устройству буронабивных свай диаметром 500 мм на строительной площадке в 16-м квартале г. Якутска [120].

Изучение кинетики твердения бетона осуществлялось испытанием контрольных образцов, изготовленных на месте бетонирования буронабивных свай. Часть контрольных образцов твердели в нормально-влажностных условиях, другая часть — в течение 1 суток в камере нормального хранения, а затем были помещены в нижнюю камеру подземной лаборатории (минус 4±0,5 °С). Образцы испытывались в возрасте 3, 7 и 28 суток [42].

В Таблице 1.2 приведены характеристики бетонных смесей с комплексными химическими добавками, исследованных в АО «ЯкутПНИИС» [120]. Результаты испытания контрольных образцов — в Таблице 1.3.

Таблица 1.2 – Характеристики бетонных смесей с комплексными химическими добавками [120]

№ п/п	Комплексная добавка	Подвижность смеси, ОК, см	Плотность бетонной смеси, кг/см ³	Объем вовлеченного воздуха, %	Температура бетонной смеси, °С
1	4 %ФН + 0,7 %ПФМ-НЛК	5	2400	-	19,0
2	2 %ФН + 0,7 %ПФМ-НЛК	9	2350	2,5	17,0

Таблица 1.3 – Результаты испытаний бетона АО «ЯкутПНИИС» [120]

№№ п/п	Маркировка состава	Комплексная добавка	Условия твердения бетона*	Прочность бетона на сжатие, МПа/ % от R_{28}^{HX} в возрасте, сут			
				3	7	14	28
1	БНС1	4 %ФН + 0,7 %ПФМ-НЛК	к.н.х.	26,4/75	28,7/82	29,0/82	35,2/100
			к.п.л.	17,9/51	23,2/70	26,7/76	33,0/94
2	БНС2	2 %ФН + 0,7 %ПФМ-НЛК	к.н.х.	25,7/67	29,6/77	28,5/74	38,3/100
			к.п.л.	14,5/39	21,3/56	25,7/67	30,4/79

Обозначения: к.н.х. — камера нормального хранения, $t_b = 20 \pm 3$ °С, $W_b^{отн} = 95 \pm 5$ %; к.п.л. — камера подземной лаборатории, $t_b = \text{минус } 4 \pm 0,5$ °С

Прочность бетонов с комплексными добавками ФН + ПФМ-НЛК в возрасте 3 суток составила 67–75 % от проектной. В 28-суточном возрасте бетон с добавкой 4 %ФН + 0,7 %ПФМ-НЛК набрал 94 % от проектной прочности, с добавкой 2 % ФН + 0,7 %ПФМ-НЛК прочность составила 79 % от проектной [42].

Нельзя не отметить, что большинством исследователей [69, 72] при изучении кинетики твердения растворов при отрицательных температурах не учитывался масштабный фактор. В действительности процесс набора прочности происходит при переменной во времени температуре, которая зависит от начальной температуры и теплофизических свойств многолетнемерзлого грунта, а также от начальной температуры бетона и габаритов сваи.

Так на Рисунке 1.6 приведены результаты испытания бетонных кернов, отобранных из опытных буронабивных свай сотрудниками ЯкутПНИИС в 2011 году. Выбуривание кернов выполнялось до глубины 10 м с отбором пробы через 1 м. В результате визуального осмотра кернов было установлено отсутствие следов расслоения бетонной смеси и недоуплотнения во всех образцах [120].

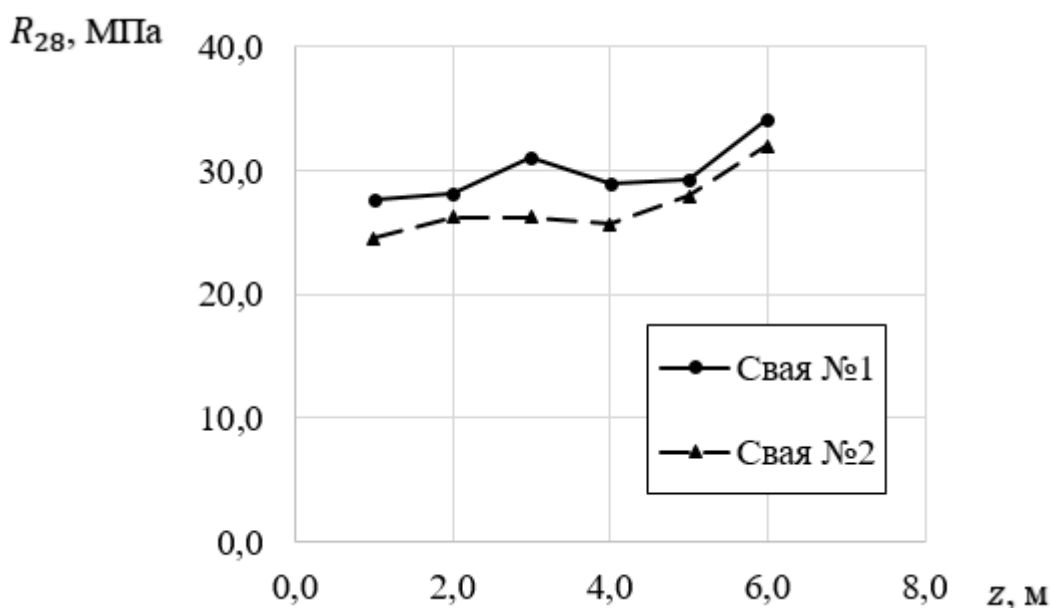


Рисунок 1.6 – Изменение прочности бетона R_{28} , МПа, по глубине z , м, буронабивных свай по данным [120]

Установлено, что средняя прочность бетона буронабивных свай на сжатие на 28-е сутки составила порядка 28,5 МПа. Частные значения прочности по глубине составили 70–100 % от марочной прочности. Колебания прочности бетонов по глубине сваи не превышают 5–6 МПа.

Здесь можно сделать вывод о том, что набора прочности бетона в условиях отрицательных температур, вмещающих многолетнемерзлых грунтов, при устройстве буровых свай возможно достигнуть путем введения в смесь различных комплексных добавок, включающих противоморозные, пластифицирующие и другие компоненты. В рамках данной работы для исследований принято использование единого состава комплексной химической добавки на основе формиата натрия в качестве противоморозного компонента.

При этом остаются нерешенными следующие вопросы: теплообмен между бетоном и грунтом, приводящий к существенному повышению температуры основания, который исследовался Кауркиным В.Д., Харичкиным А.И. и Иоспой А.В. [66], Рязановым А.В. и Усачевым А.А. [108], Цеевой А.Н., Матвеевой О.И. и Семеновым Н.П. [121], а также миграция солей из растворов в мерзлые грунты и влияние этой миграции на характеристики грунтов оснований и на несущую способность свай, которые исследовались Костяевым П.С. [62], Курушиным А.Д. [65], Лукиной Ф.Х. [67] и другими учеными.

1.4. Теплообмен между материалом сваи и многолетнемерзлым грунтом

В настоящее время задачи распространения тепла в многолетнемерзлых грунтах с фазовыми переходами решаются преимущественно численными конечноразностными методами [66, 108]. Так, процесс распространения тепла в грунте описывается дифференциальным уравнением, записанным в энтальпийной форме:

$$\frac{\delta H}{\delta \tau} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + f, \quad (1.1)$$

где $H = H(\tau, T)$ — энтальпия (теплосодержание), отнесенная к единице объема грунта;

τ — время;

$T = T(\tau)$ — температура грунта;

$\lambda = \lambda(T)$ — коэффициент теплопроводности грунта;

$f = f(\tau)$ — мощность внутренних источников тепла.

Энтальпия является функцией температуры времени и координат. С учетом теплоты фазовых переходов в грунте, энтальпия описывается уравнением:

$$H(T_1) = \int_0^{T_1} [C(T) + Q \cdot \delta(T - T_{bf})] dT, \quad (1.2)$$

где $C = C(T)$ — теплоемкость грунта;

Q — теплота фазового перехода;

T_{bf} — температура фазового перехода;

$\delta(T - T_{bf})$ — дельта-функция.

Соответственно, исходными данными для моделирования служат параметры этих уравнений (начальная температура грунта, теплопроводность, теплоемкость, температура начала замерзания и другие) [61]. Изменение начального состояния осуществляется путем задания в модели граничных условий первого, второго или третьего родов, характеризующихся зависимостями температуры и теплового потока от времени.

Как отмечалось ранее, путем введения в состав раствора комплексных химических добавок возможно достичь твердения бетона без дополнительных мероприятий по электропрогреву. При этом в соответствии с технологией производства работ по устройству буровых свай раствор подается в скважину при температуре плюс 20 °С, тем самым в основание вносится дополнительное количество тепла.

При значительных диаметрах свай и высоких температурах мерзлых грунтов положительная температура бетона сохраняется достаточно долго для начала процесса гидратации, который также происходит с выделением тепла при экзотермической реакции минералов цемента с водой.

Количество тепловой энергии изменяется в зависимости от состава и начальной температуры раствора. В основном выделение тепловой энергии происходит в первые сутки после затворения раствора (85–90 %), порядка 200–400 кДж/кг [66]. Так, путем создания в численной теплотехнической модели на поверхности сваи граничного условия с тепловым потоком, соответствующим тепловыделению бетона, возможно определить радиус оттаивания грунта вокруг сваи в результате ее устройства и время вмерзания. Для этого требуются экспериментальные данные о тепловыделении в заданных температурных условиях при устройстве буронабивных свай [108].

В последние годы изучением теплового влияния от устройства буронабивных свай на многолетнемерзлые грунты в ЯкутПНИИС занимались Цеева А.Н. и Матвеева О.И. [121]. Так, в 2011 году сотрудниками института проведена полевая экспериментальная работа по замерам температуры грунтов основания двух буронабивных свай диаметром 650 мм.

Для наблюдения за изменениями температуры грунтов и бетона в процессе твердения на экспериментальной площадке устанавливались температурные трубки [42]. На Рисунке 1.7 представлены графики изменения температуры грунта по глубине на границе бетона и грунта через 1, 3, 7 и 28 суток после устройства свай.

Видно, что в первые сутки температуры грунтов повышаются до плюс 2–4 °С, через семь суток снижаются ниже плюс 1 °С, через 28 суток на глубине ниже 3 м практически устанавливаются отрицательные температуры грунтов на границе с бетоном свай. При наличии данных об изменении температуры можно судить о тепловом потоке от свай в многолетнемерзлый грунт путем решения обратной задачи, описанной выше.

По данным Ефимова В.М., наиболее интенсивно процесс тепловыделения происходит в начале твердения, что позволяет бетону набирать прочность даже при характерных для мерзлых грунтов отрицательных температурах [58]. На Рисунке 1.8 приведены графики распределения температуры бетона по глубине буронабивной свай диаметром 650 мм, изготовленной без химических добавок, при строительстве жилого дома в городе Якутске, построенные по данным авторов [58].

Обычные портландцементы выделяют 50 % теплоты за первые трое суток, 75 % — за 7 суток. В той же работе приведены данные различных авторов по теплоте гидратации цемента трехкальциевого алюминатного состава: 7 суток — 592 кДж/кг, 90 суток — 663 кДж/кг, 189 суток — 873 кДж/кг [58].

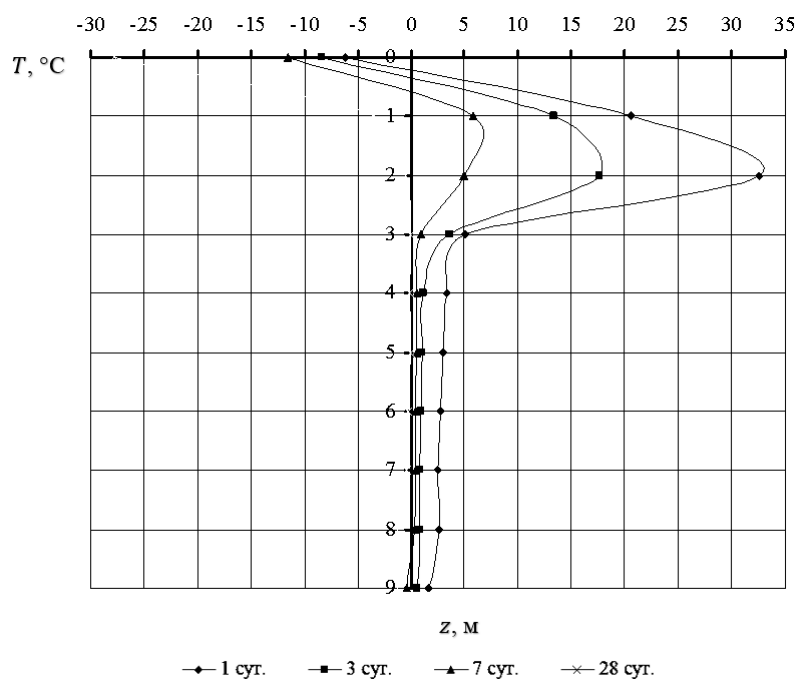


Рисунок 1.7 – Распределение температуры грунта T , °C, по глубине z , м, на границе бетона и грунта [121]

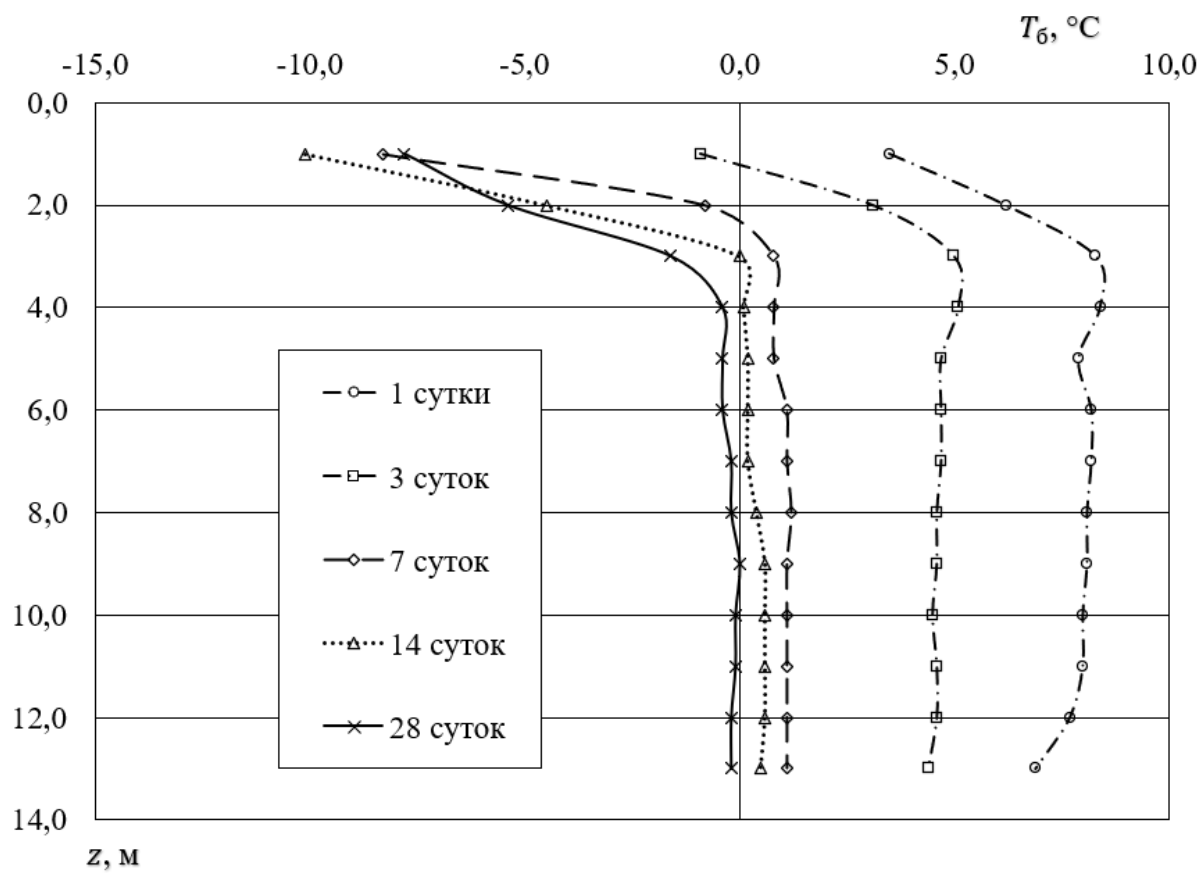


Рисунок 1.8 – Распределение температуры бетона T_6 , °C, по глубине z , м по данным [58]

Достоверное определение времени восстановления естественных температур многолетнемерзлого основания буровой сваи, изготовленной с применением химических добавок, является только одной из задач, решение которой позволяет на стадии проектирования судить о сроках возможного нагружения фундаментов. Второй, но не менее значимой задачей является определение степени засоленности мерзлых грунтов вокруг свай, в свою очередь зависящей от времени, при котором грунт находится в талом состоянии, а процесс миграции солей из бетона в грунт протекает наиболее интенсивно.

1.5. Массообмен между материалом сваи и многолетнемерзлым грунтом

1.5.1. Процесс массообмена и его интенсивность при устройстве свай

Как известно, несущая способность висячих буровых свай на 70–80 % определяется сопротивлением по боковой поверхности. Напряженное состояние системы свая — грунт формируется в процессе устройства сваи и определяется свойствами бетонной смеси и особенностями усадки бетона, влажностью окружающего сваю грунта, его консистенцией, напряжениями в грунте от собственного веса и другими. Имеются данные, что вследствие изменения технологических особенностей устройства буронабивных свай в талых (немерзлых) грунтах разброс их несущей способности может достигать 40 % при прочих равных условиях [56].

Изменение влажности грунта вблизи буронабивных свай в полевых условиях изучалось Дзаговым А.М. [55]. Им отмечено, что грунт в зоне 200 мм около сваи интенсивно увлажняется в первый час после укладки бетонной смеси в скважину. При этом количество свободной воды в смеси уменьшается по экспоненциальной зависимости за счет связывания цементом. Окончание схватывания и начало твердения бетона сопровождается обратной миграцией влаги, профильтровавшей в грунт в период схватывания.

График изменения влажности грунта W , %, на расстоянии l , см, от боковой поверхности буронабивной сваи во времени по данным [55] представлен на Рисунке 1.9.

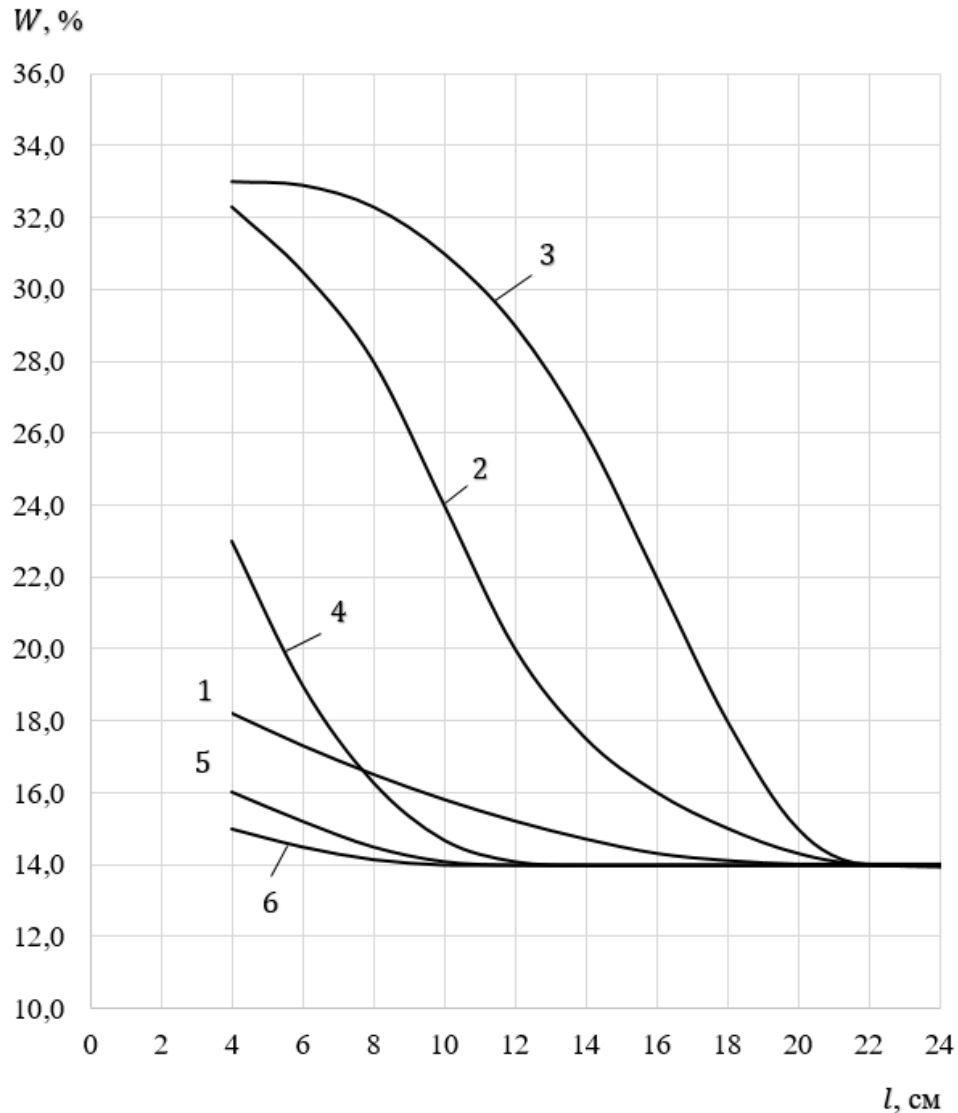


Рисунок 1.9 – Изменение влажности грунта W , %, на расстоянии l , см, от боковой поверхности буронабивной сваи во времени по данным [55]:

1 — до начала бетонирования; 2 — через 5 ч после заполнения скважины бетоном; 3 — через 1 сут; 4 — через 14 сут; 5 — через 28 сут; 6 — через 2 мес.

Причиной обратной миграции влаги является контракция (химическая усадка) бетона, приводящая к увеличению пористости цементного камня в твердеющем бетоне. При образовании пор в системе возникает вакуум, под влиянием которого они заполняются водой, мигрирующей из увлажненного грунта

контактной зоны. Поступающая из грунта вода, взаимодействующая с не до конца прогидратировавшими зернами цемента, вызывает набухание бетона. Величины деформаций набухания и усадки ствола сваи зависят от применяемого состава бетона и степени влажности окружающего сваю грунта.

В зарубежной литературе также уделяется определенное внимание изменению влажности талых (немерзлых) грунтов на контакте с буронабивными сваями. Считается, что с возрастанием влажности имеет место снижение сопротивления грунтов сдвигу на боковой поверхности сваи [55]. Известно также, что увеличение влажности многолетнемерзлых грунтов до определенного предела влечет за собой повышение механических свойств основания, в связи с чем наличие влагообмена как такового для буровых свай в криолитозоне носит второстепенный характер в связи со следующим обстоятельством.

В процессе устройства буровых свай, изготовленных с применением химических добавок в многолетнемерзлых грунтах, имеет место перенос солей — компонентов добавок в основание, а, следовательно, и его засоление, приводящее к снижению прочностных характеристик грунтов [42, 74, 77, 105, 120]. Процесс переноса солей в многолетнемерзлых грунтах при устройстве буровых свай, изготовленных с применением химических добавок для обеспечения твердения бетона, может определяться конвективным переносом ионов.

Движение поровой воды в оттаивающих грунтах может определяться фильтрацией и миграцией поровой влаги. Скорость фильтрационного потока V_{ϕ} , м/с, в соответствии с законом ламинарной фильтрации Дарси зависит от коэффициента фильтрации k_{ϕ} , м/с, вмещающего сваю грунта и гидравлического градиента $\left(\frac{dH}{dl}\right)$:

$$V_{\phi} = k_{\phi} \left(\frac{dH}{dl}\right). \quad (1.3)$$

Скорость миграции V_m , м/с, в соответствии с законом Букингема, зависит от коэффициента миграции k_m и градиента температуры и влажности $\left(\frac{dP}{dz}\right)$,

описанного Лыковым А.В. [80], где функцией температуры и влажности является внутреннее давление $P = P(W, T)$:

$$V_m = k_m \left(\frac{dP}{dz} \right). \quad (1.4)$$

Массоперенос в дисперсных средах в целом возникает при неоднородности системы, обусловленной изменением в пространстве температуры, влажности, концентрации ионов и других параметров.

Так, движение ионов в поровой воде может определяться диффузионным потоком, который по первому закону Фика связан с градиентом концентрации $\left(\frac{dc_{ps}}{dx} \right)$ через коэффициент диффузии k_d :

$$V_d = k_d \left(\frac{dc_{ps}}{dx} \right). \quad (1.5)$$

Конвективный массоперенос из бетона в грунт протекает до замерзания воды в порах грунта. По данным Курушина А.Д. [77], предельная засоленность грунтов за счет выхода ионов солей из бетона, полученная по результатам экспериментальных исследований, составляет 0,5 % от массы сухого грунта, что соответствует слабой степени засоленности, но все равно влияет на прочность.

При замерзании поровой влаги в грунте конвективная часть переноса ионов солей прекращается, однако продолжается и при отрицательной температуре за счет диффузии. По данным лабораторных исследований Чувилина Е.М. [83], по определению проницаемости чистого льда, а также каолининовой и монтмориллонитовой суспензий для ионов натрия, проведенных при температуре минус 7 °С, максимальный поток ионов отмечается во льду, минимальный — в монтмориллонитовой суспензии.

Испытания проводились при контактном взаимодействии образцов с растворами соли, на различном расстоянии от места контакта измерялась концентрация ионов натрия. На Рисунке 1.10 приведен характер распределения

ионов в зависимости от расстояния до места контакта по данным [83], из которого следует, что за счет диффузии концентрация ионов на различающемся в зависимости от материала расстоянии до места контакта повышается.

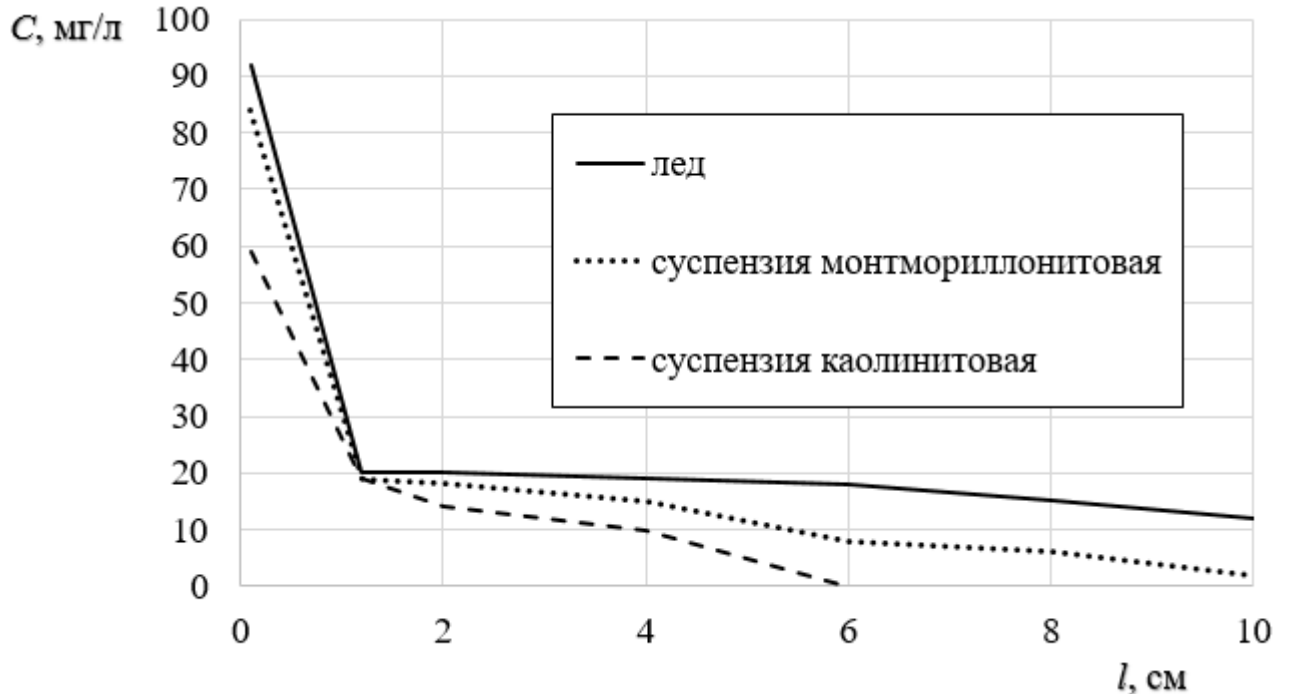


Рисунок 1.10 – Характер распределения ионов в зависимости от расстояния до места контакта образца с раствором по данным [83]

В целом процессы переноса поровой жидкости и ионов зависят от множества факторов: начальной концентрации солей и температуры бетона; начальной температуры, коэффициентов фильтрации и диффузии, теплофизических свойств грунтов основания; диаметра и длины буровой сваи и других.

В работе [120] приведены результаты исследования переноса противоморозных добавок (3 %ХК и 3 %ХН) из уложенного бетона в многолетнемерзлый грунт. Исследовался бетон состава 1:2,6:4,3 при В/Ц=0,65. Миграция солей сопровождалась выносом влаги из свежего бетона в грунт около 17 л/м³ бетона при применении ХК и около 31 л/м³ при использовании ХН. В результате исследования установлено, что на расстоянии 50...100 мм от поверхности бетона изменение засоленности грунтов незначительно. Максимальное повышение степени засоленности грунтов отмечено на расстоянии

25 мм от поверхности бетона примерно через 14 и 7 суток для добавок ХК и ХН и составило соответственно 0,16 % и 0,40 %. В дальнейшем отмечено интенсивное снижение засоленности грунтов в течение месяца — 0,13 % и 0,26 % соответственно при применении ХК и ХН. Анализируя результаты наблюдений, авторы отмечают, что для устройства буронабивных свай предпочтение необходимо отдавать противоморозным добавкам, химически связывающимся с минералами цементного клинкера (ХК, НК и др.), с установлением оптимальной дозировки.

Изучение процесса миграции солей из бетона в мерзлый грунт проводилось на бетонах с добавками 1,5 %ХК + 1,5 %НН и 1,5 %ХК + 3 %НН + 0,2 %ЛСТ при В/Ц соответственно 0,45 и 0,41 [120]. Эксперимент проводился в подземной камере при температуре грунтов минус $4 \pm 0,5$ °С. Наблюдаемым параметром было накопление ионов хлора, натрия и кальция через 1, 14, 28 суток и через 1 год. Анализ кинетики накопления указанных ионов в грунте показывает, что в течение месяца миграционные процессы стабилизируются. Результаты эксперимента также показали, что характер миграции солей из бетона в боковые и нижние слои грунта связан с процессами влагопереноса и температурой замерзания поровой воды. Так, при применении добавки ХК + НН из-за быстрого замерзания свободной воды отток ее в боковые поверхности не отмечен. При использовании второй добавки ХК + НН + ЛСТ поровая влага в бетоне не замерзает, что и обуславливает миграцию поровой воды из бетона как по вертикали вниз, так и через боковые поверхности.

Данные исследований также свидетельствуют о том, что повышение засоленности грунта происходит в начальный период времени при оттаивании околосвайного пространства за счет фильтрационного переноса порового раствора бетона в грунт и диффузии в поровых растворах бетона и грунта и протекает до замерзания воды в порах грунта.

При избытке поровой жидкости в бетоне она не вся адсорбционно связывается, а ее часть вытесняется из раствора под влиянием градиента внутреннего давления. Количество вытесненной жидкости зависит от начального

ее содержания в растворе и адсорбционной способности цемента, то есть от водоцементного соотношения.

Кроме того, несмотря на внесение в грунт дополнительного количества воды во время его оттаивания, примыкающий к свае слой грунта может обезвоживаться в результате миграции поровой влаги к фронту промерзания и обратного осмоса. Однако возможен и прямой осмос при взаимодействии грунтов с высококонцентрированными растворами солей, приводящий к движению жидкости в направлении, обратном потоку ионов.

Уже в мерзлом грунте перенос солей также происходит, но только за счет диффузии, и имеет тенденцию к снижению концентрации порового раствора грунта — рассолению.

Курушиным А.Д. разработана модель взаимодействия бетона буронабивной сваи с окружающим многолетнемерзлым грунтом, согласно которой на начальном этапе процесс засоления талой контактной области грунта обуславливается потоком жидкости, выходящей из бетона в грунт [77]. Величина этого потока определяется только величиной объема, освобожденного в грунте за счет таяния льда. С момента остановки фронта оттаивания поток жидкости изменяет направление. Средняя равновесная концентрация, достижимая в оттаявшем слое к моменту поворота фронта фазовых переходов, определяется по формуле:

$$\bar{C}_{ps} = \frac{\delta \cdot C_{ps,0} \cdot \exp(\sigma \cdot (1-\delta) \cdot \xi \cdot t / 6)}{\sigma(1-\delta) \cdot \xi \cdot t} (1 - \exp(-\sigma \cdot (1-\delta) \cdot \xi \cdot t)), \quad (1.6)$$

где $C_{ps,0}$ — концентрация порового раствора в бетоне, д. ед.;

ξ — расстояние от сваи до фронта оттаивания, м;

t — время, сут;

δ — доля в объеме жидкости, освобожденная в грунте за счет таяния льда, д. ед.;

σ — размерный множитель.

В мерзлом грунте засоление происходит за счет диффузии, обусловленной наличием незамерзшей воды. Зависимость концентрации порового раствора грунта от времени и расстояния от сваи $C_{ps}(x, t)$ записывается в следующем виде:

$$C_{ps}(x, t) = \frac{C_{ps,0}}{2\alpha\sqrt{\pi t}} \left[\int_0^l \exp\left(-\frac{(x-\xi)^2}{4\alpha^2 t}\right) d\xi + \int_0^l \exp\left(-\frac{(x+\xi)^2}{4\alpha^2 t}\right) d\xi \right], \quad (1.7)$$

где x — расстояние от сваи, м;

α — параметр, м/сут^{1/2}, зависящий от коэффициента осмотической диффузии k_d , м²/сут, и эффективной пористости грунта $n_{эф}$, д ед., и определяемый по формуле:

$$\alpha = \sqrt{k_d/n_{эф}}. \quad (1.8)$$

С использованием уравнений (1.6–1.8) возможно оценить концентрацию порового раствора грунта на контакте с буровой сваей, изготовленной с использованием химических добавок, в требуемый момент времени после устройства сваи.

При этом в начальный момент времени концентрация порового раствора грунта на контакте со сваей независимо от его вида максимальна и равна концентрации порового раствора в бетоне. Далее происходит увеличение концентрации порового раствора в грунте на удалении от бетона сваи, область изменения концентрации определяется размером зоны оттаявшего грунта. Затем происходит постепенное замерзание грунта основания сваи и сокращение зоны изменения концентрации. В течение всего этого времени при наличии градиентов напора, температуры, влажности происходит выравнивание концентрации и соответственно степени засоленности грунта.

В итоге можно заключить, что при правильном выборе вида и дозировки добавки, а также водоцементного соотношения в растворе можно регулировать миграцию солей из бетона в грунт и снижать негативное влияния химических

добавок на прочность мерзлого грунта. Например, исследования ЯкутПНИИС [120] также показали, что использование формиата натрия в качестве противоморозного компонента в определенных условиях позволяет значительно сократить степень засоленности мерзлого грунта вокруг буронабивной сваи.

1.5.2. Влияние степени засоленности на прочность мерзлых грунтов

Под понятием прочности понимается способность материала сопротивляться разрушающему воздействию внешних сил. Прочность мерзлых грунтов при этом может определяться как разрушением, так и предельной величиной деформации. Разрушение мерзлых пород происходит только при больших величинах напряжений и характеризуется возрастанием скорости деформирования, то есть разрушение имеет вязкий характер. Для засоленных мерзлых пород даже при высоких нагрузках наблюдается в основном затухающая ползучесть, поэтому в понятие прочности вкладывается в основном смысл избыточной деформации [33].

Кроме того, для мерзлых грунтов вводятся понятия длительной прочности, характеризующей снижение величины разрушающего напряжения с течением времени, и предела длительной прочности, соответствующего напряжению, до превышения которого деформация имеет затухающий характер, а разрушение не происходит независимо от длительности приложения нагрузки.

Так, сопротивление мерзлого грунта сдвигу R_{sh} зависит от нормального давления, плотности, влажности, текстуры и определяется уравнением:

$$R_{sh} = C_t + \sigma \cdot \tan \varphi_t, \quad (1.9)$$

где C_t — сцепление;

σ — нормальное давление;

φ_t — угол внутреннего трения.

При этом, в отличие от условия Кулона, сцепление C_t и угол внутреннего трения φ_t здесь зависят от температуры и времени действия сдвигающей

нагрузки [123]. Сопротивление мерзлого грунта сдвигу увеличивается со снижением температуры и увеличением нормального давления, однако снижается во времени.

Если нагрузку прикладывать быстро, то деформация ползучести не успевает развиваться и происходит хрупкое разрушение, причем сопротивление разрушению, так называемая мгновенная прочность $R_{sh,0}$, будет наибольшей. При этом предполагается наличие предела длительной прочности R_{sh} , до превышения которого разрушение не наступает вне зависимости от времени (Рисунок 1.11).

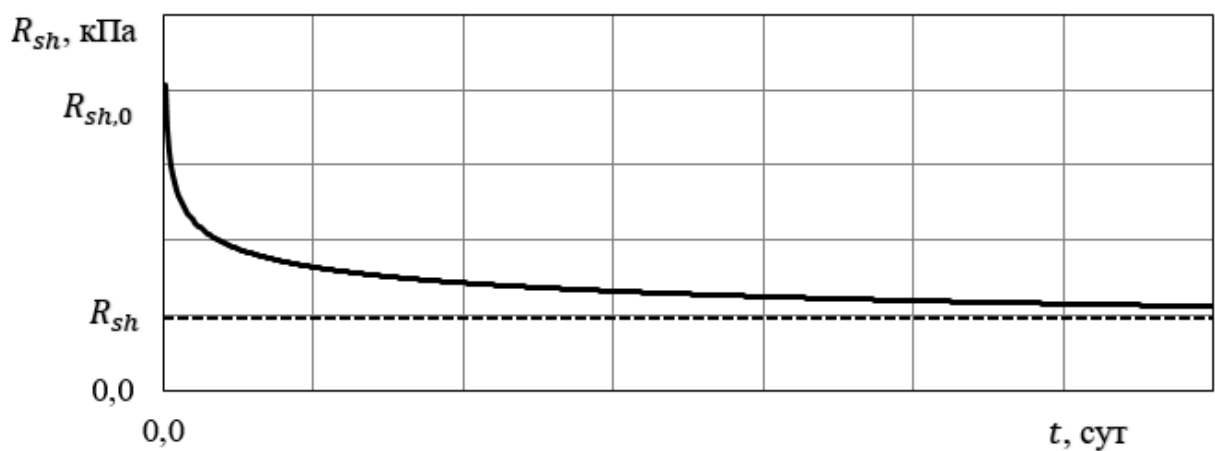


Рисунок 1.11 – Зависимость сопротивления мерзлого грунта сдвигу R_{sh} от времени действия нагрузки t [123]

Первые исследования длительной прочности мерзлых грунтов применительно к сдвигающим нагрузкам проведены Гольдштейном М.Н. [47] еще в 40-х годах прошлого века. Тогда же Цытовичем Н.А. [123] установлена зависимость сдвиговой прочности мерзлых грунтов от влажности, и показано, что силы смерзания грунтов с поверхностью сваи принимают максимальные значения при полном водонасыщении.

Кроме того, сопротивление мерзлых грунтов сдвигу зависит от нормального давления и гранулометрического состава (с увеличением основной фракции до определенного предела сопротивление сдвигу возрастает), а силы смерзания грунтов с материалом сваи — от шероховатости ее поверхности.

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на прочность многолетнемерзлых грунтов, является их засоленность [38]. Так, увеличение степени засоленности мерзлых грунтов на 0,4–0,5 % может приводить к двукратному снижению сдвиговой прочности [33]. С увеличением степени засоленности с 0 до 0,8 % сопротивление мерзлого грунта сдвигу может снижаться на 70–90 %.

На Рисунке 1.12 приведен график зависимости прочности смерзания мерзлых песчаных и глинистых грунтов с бетоном от степени засоленности, построенный по данным [13].

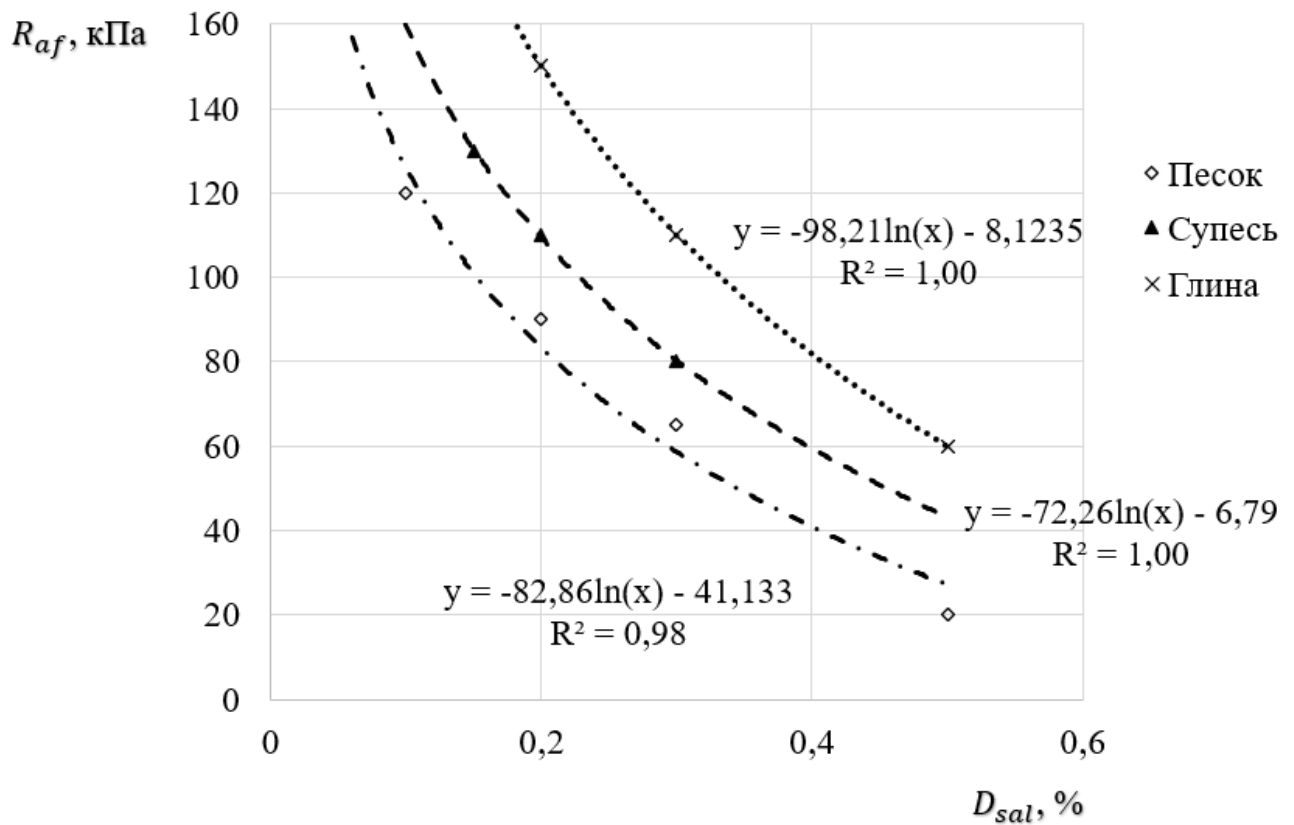


Рисунок 1.12 – Зависимость прочности смерзания мерзлых грунтов с бетоном R_{af} от степени засоленности D_{sal} при температуре минус 3 °С по данным [13]

Прочность глинистых грунтов при их засолении снижается меньше, чем песчаных грунтов. По данным Аксенова В.И. [20], прочность смерзания тяжелого суглинка с материалом сваи при температуре минус 3 °С может снижаться с 200 до 65 кПа при увеличении степени засоленности с 0 до 0,5 %. График зависимости

прочности смерзания мерзлого тяжелого суглинка с бетоном от степени засоленности представлен на Рисунке 1.13.

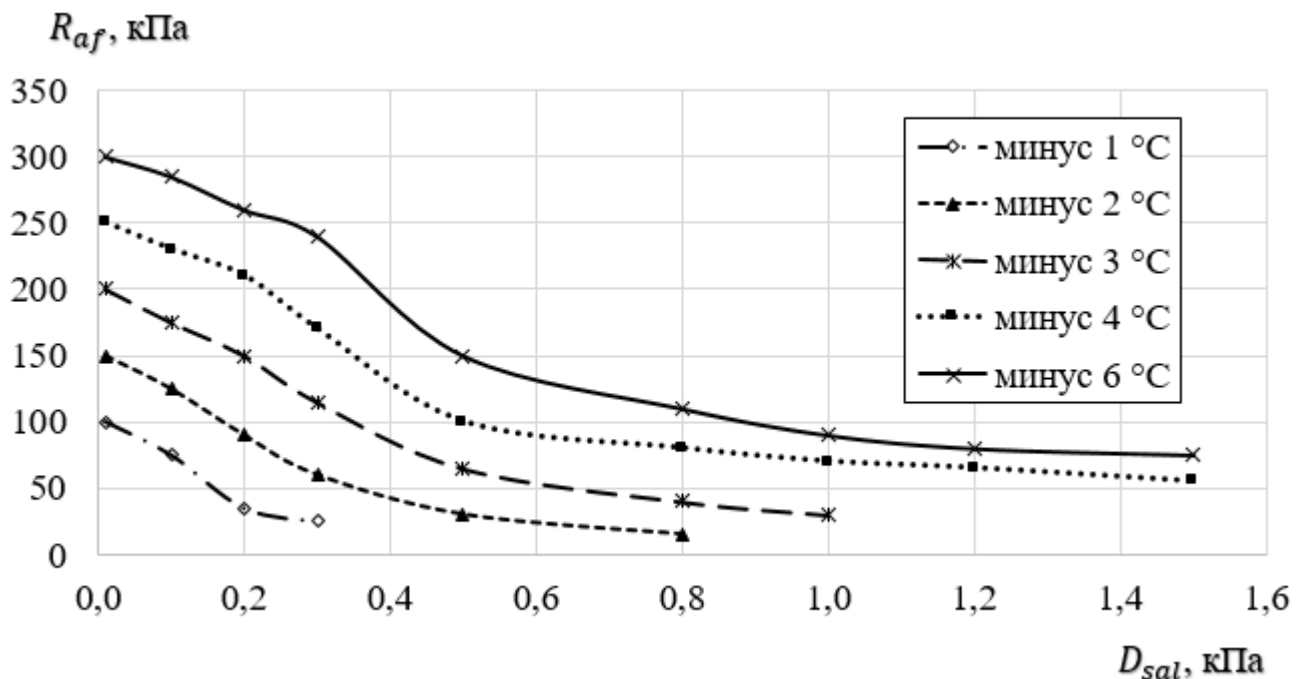


Рисунок 1.13 – Зависимость прочности смерзания мерзлого тяжелого суглинка с бетоном R_{af} от степени засоленности D_{sal} по данным [20]

Для песков даже незначительное увеличение степени засоленности может приводить их состояние в охлажденное, то есть происходит снижение температуры начала замерзания грунта ниже естественной температуры его залегания.

С точки зрения устройства буровых свай, затворенных с применением химических добавок для обеспечения твердения, переход грунтов в охлажденное состояние становится преимуществом в случае использования основания по принципу II с допущением оттаивания. Грунт вокруг сваи оттаивает за счет внесения дополнительного тепла от бетона и уже не замерзает вследствие увеличения степени засоленности.

При использовании мерзлых грунтов по принципу I переход грунтов в охлажденное состояние будет приводить к чрезмерному снижению несущей способности свай. Поэтому одной из наиболее важных задач при проектировании буровых свай с добавками должен являться подбор такого состава бетона, который

обеспечивает набор прочности бетона, но не снижает температуру начала замерзания грунта ниже естественной температуры основания.

1.5.3. Расчет буровых свай в многолетнемерзлых грунтах

В настоящее время процесс проектирования ведется исходя из принципов обеспечения надежности строительных конструкций сооружения, в том числе фундамента и его основания. Под надежностью понимается способность конструкции соответствовать установленным требованиям в течение всего срока эксплуатации объекта. Основным условием обеспечения надежности является выполнение требований для всех учитываемых предельных состояний первой и второй групп.

Практика строительства в криолитозоне по принципу I показала, что основным требованием для обеспечения надежности сооружений является выполнение условий по первой группе предельных состояний — в частности, по несущей способности грунтов основания свай.

Расчет по первой группе предельных состояний производится исходя из условия, что расчетная нагрузка F не должна превышать допускаемую нагрузку F_u/γ_n , где F_u — несущая способность основания, а γ_n — коэффициент надежности по ответственности сооружения.

Несущая способность свай F_u , кН, в соответствии с методикой [13], определяется по формуле:

$$F_u = \gamma_t \gamma_c (RA + \gamma_{af} \sum R_{af,i} A_{af,i}), \quad (1.10)$$

где γ_t — температурный коэффициент, учитывающий изменения температуры грунтов основания из-за случайных изменений температуры наружного воздуха;

γ_c — коэффициент условий работы основания;

R — расчетное сопротивление мерзлого грунта под нижним концом свай, кПа;

A — площадь опирания свай на грунт, м²;

γ_{af} — коэффициент, зависящий от вида поверхности смерзания;

$R_{af,i}$ — расчетное сопротивление мерзлого грунта или грунтового раствора сдвигу по боковой поверхности смерзания сваи в пределах i -го слоя грунта, кПа;

$A_{af,i}$ — площадь поверхности смерзания i -го слоя грунта с боковой поверхностью сваи, м^2 .

Сопротивление мерзлого грунта сдвигу по боковой поверхности сваи определяется по результатам испытаний образцов грунта методом одноплоскостного среза сдвигающей нагрузкой при заданном нормальном давлении. Величина нормального давления σ_{r1} определяется в зависимости от напряженного состояния массива с учетом глубины залегания образца (давление от собственного веса грунта, умноженное на коэффициент бокового давления).

В то же время исследования различных авторов в талых (немерзлых) грунтах показывают, что при действии на сваю осевой вдавливающей нагрузки по контакту сваи с грунтом возникают дополнительные горизонтальные давления σ_{r2} . Например, Дзаговым А.М. [55] путем проведения натурных испытаний тензометрических свай показана неприемлемость для расчетов нормальных (радиальных) давлений коэффициентов бокового давления K_0 , определенных расчетом с использованием угла внутреннего трения.

Таким образом уравнение (1.9) для определения сопротивления мерзлого грунта сдвигу принимает следующий вид:

$$R_{sh} = C_t + (\sigma_{1x} + \sigma_{2x}) \cdot \tan \varphi_t, \quad (1.11)$$

где σ_{r1} — радиальное давление, обусловленное собственным весом грунта;

σ_{r2} — радиальное давление, обусловленное осевой нагрузкой на сваю;

C_t, φ_t — см. формулу (1.9).

Как было показано выше, прочность мерзлого грунта может значительно снижаться при увеличении степени засоленности. При устройстве буровых свай с добавками происходит массоперенос ионов солей в грунт, поэтому фактическая

засоленность грунтов вокруг свай может изменяться по отношению к начальной, определенной в рамках изысканий.

Прочностные свойства грунтов, подставляемые в формулу (1.11) и определяемые путем проведения лабораторных испытаний, не соответствуют своим значениям для буровых свай, устраиваемых с применением химических добавок.

С целью исключения массопереноса солей в грунты основания свай, в частности под пятой, Курушиным А.Д. [77] предложено использовать защитный слой, в качестве материала которого применять бетон без добавок, щебень или цемент. Из условия исключения массопереноса определена требуемая толщина защитного слоя, которая равняется 100 мм для бетона без добавок, 300 мм для щебня, 50 мм для слоя цемента. В таком случае использование дополнительных коэффициентов для определения сопротивления мерзлого грунта под нижним концом свай R не требуется.

Использование такой подушки также полезно для снижения теплового воздействия свежесложенного бетона на многолетнемерзлые грунты. Ореол оттаивания в основании снижается, тем самым ускоряя процесс дальнейшего вмерзания, без которого не допускается передача нагрузки на фундамент.

Однако, как показывает практика проектирования и строительства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах, несущая способность под пятой свай зачастую не превышает 10–20 % от общей несущей способности. Поэтому в настоящее время больший практический интерес представляет определение параметров R_{af} и R_{sh} .

Важным, при расчете несущей способности свай в многолетнемерзлом грунте по боковой поверхности является определение поверхности сдвига. Для буроопускных свай известно, что это могут быть поверхности свая — раствор, раствор — раствор, раствор — грунт, грунт — грунт [32, 110].

При проектировании буронабивных свай расчетное сопротивление мерзлого грунта или грунтового раствора сдвигу по поверхности смерзания с материалом свай R_{af} заменяется на сопротивление грунта сдвигу R_{sh} . Эти два параметра

характеризуют два различных механизма сдвига. Первый параметр R_{af} характеризует сдвиг по заранее сформированной поверхности, обусловленный смерзанием материала (бетона или стали) с грунтом. Второй параметр R_{sh} характеризует сопротивление сдвигу самого грунта или грунтового раствора и является аналогом параметра f — сопротивления талого (немерзлого) грунта на боковой поверхности свай.

R_{sh} и f могут быть определены по результатам испытаний образцов грунта на одноплоскостной срез. Существенной разницей в методиках их определения является критерий условной стабилизации деформации. При испытании мерзлых грунтов (для определения R_{sh}) за критерий принимают скорость деформации, не превышающую 0,001 мм/ч, при испытании талых (немерзлых) грунтов (для определения f) — 0,6 мм/ч.

Параметр R_{sh} в среднем выше, чем R_{af} , что часто связано с гладкостью поверхности стенок железобетонных или стальных свай заводского производства. Поэтому расчетная несущая способность буронабивной свай при равных условиях должна быть заведомо выше, чем бурозабивной, опускной или буроопускной. Однако для буронабивных свай, изготовленных с применением добавок, [13] устанавливает частный коэффициент надежности $\gamma_{sh} = 0,7$ для параметра R_{sh} .

Исследования [77], проведенные Курушиным А.Д., свидетельствуют о том, что наибольшему влиянию солей противоморозных добавок при их миграции из бетона при устройстве свай подвержены песчаные грунты. Их прочностные свойства при этом могут снижаться более чем на 50 %. В глинистых грунтах интенсивность массопереноса ниже, так же, как и снижение прочности за счет засоления.

Это свидетельствует о зависимости степени массопереноса от фильтрационных свойств грунтов, а также о том, что расчет несущей способности буровой свай, затворенной с противоморозными добавками, в песчаном грунте может давать заведомо завышенные результаты, что вовсе недопустимо.

На Рисунках 1.14–1.15 приведены зависимости сопротивления мерзлого песчаного и глинистого грунтов сдвигу по поверхности смерзания со свай от

температуры для добавок НН — 3 % и ХК + НН — 5 % от массы цемента по данным [105].

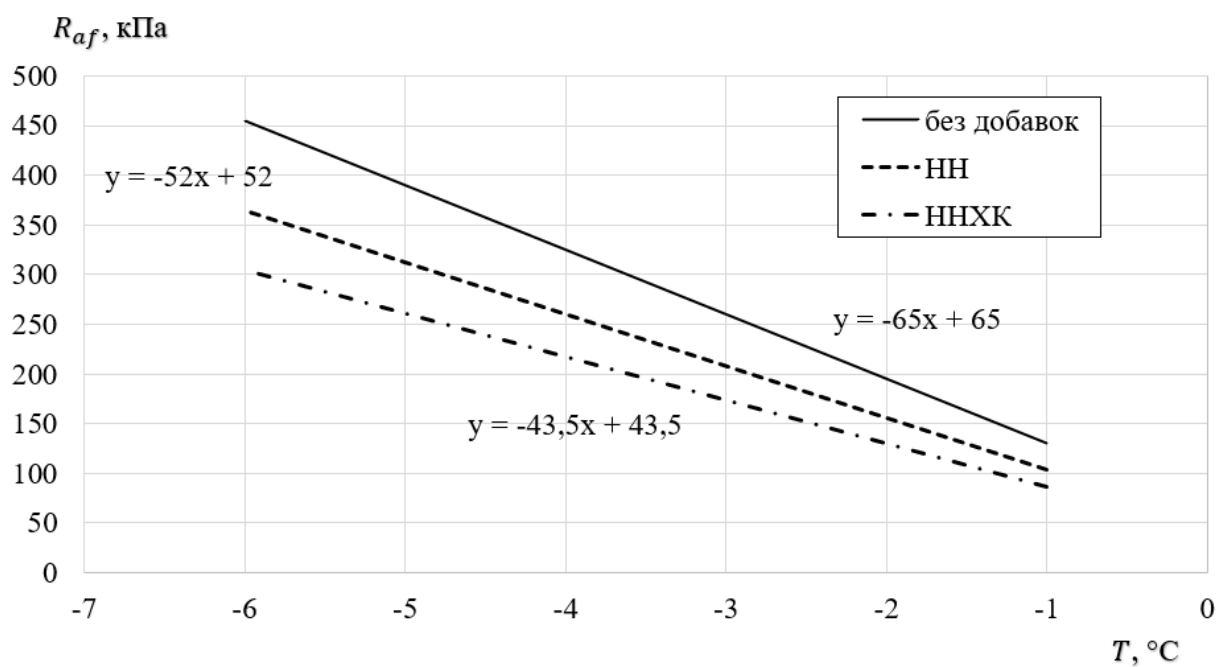


Рисунок 1.14 – Зависимость сопротивления мерзлого песчаного грунта сдвигу по поверхности смерзания со сваей R_{af} , кПа, от температуры T , °C [105]

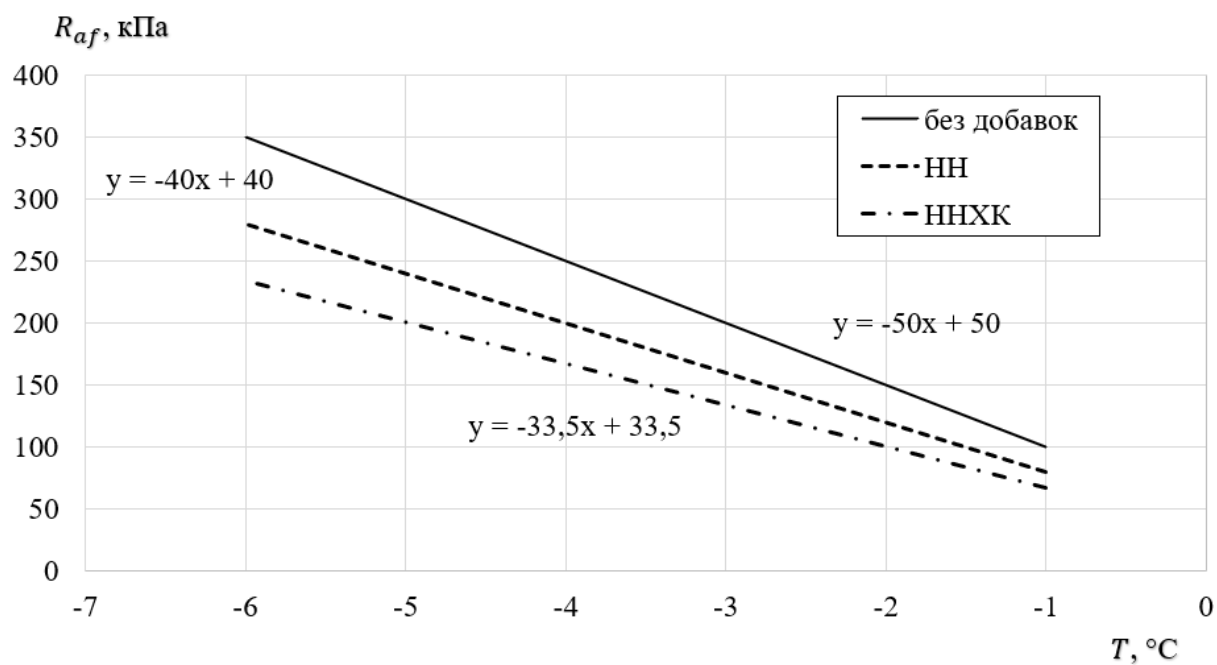


Рисунок 1.15 – Зависимость сопротивления мерзлого глинистого грунта сдвигу по поверхности смерзания со сваей R_{af} , кПа, от температуры T , °C [105]

То, что прочность представлена в виде сопротивления грунта сдвигу по поверхности смерзания R_{af} , говорит о том, что испытания на одноплоскостной срез проведены для заранее подготовленных бетонных плашек, смороженных с засоленным грунтом. Следовательно, представленные зависимости характеризуют изменение параметра от засоленности, но ничего не говорят о том, как сильно засоленность грунта может измениться вследствие устройства буровой сваи.

Таким образом на основании анализа литературных данных показано, что вопрос достоверного определения предельно длительного сопротивления искусственно засоленного грунта сдвигу на боковой поверхности буровых свай является актуальной задачей.

Другим не менее важным расчетом при проектировании является проверка устойчивости свай при воздействии касательных сил морозного пучения, которая производится по формуле:

$$\tau_{fh} A_{fh} - F \leq \frac{\gamma_c \gamma_t}{\gamma_n} F_r, \quad (1.12)$$

где τ_{fh} — расчетная удельная касательная сила морозного пучения, кПа, определяемая опытным путем или по табличным данным [13];

A_{fh} — площадь боковой поверхности смерзания фундамента в пределах расчетной глубины сезонного оттаивания грунта, м²;

F — расчетная нагрузка на фундамент, кН;

F_r — расчетная сила, удерживающая фундамент от выпучивания, кН;

γ_c — коэффициент условий работы;

γ_t — температурный коэффициент;

γ_n — коэффициент надежности по ответственности сооружения.

При устройстве буровых свай, изготовленных в многолетнемерзлом грунте с использованием химических добавок, значения касательных сил морозного пучения τ_{fh} , действующих на сваю, могут меняться аналогично изменению значений параметра сопротивления грунта сдвигу R_{sh} .

Вопросом влияния засоления грунтов вокруг свай в слое сезонного оттаивания на величину касательных сил морозного пучения занимались Алексеев А.Г. [22], Цытович Н.А. [125] и другие. Авторами установлено, что увеличение засоленности грунтов в диапазоне высоких концентраций приводит к снижению криогенного пучения, при этом отмечено возрастание деформаций пучения в интервале низкой степени засоленности. На Рисунке 1.16 приведена зависимость относительной деформации морозного пучения от засоленности грунта [22].

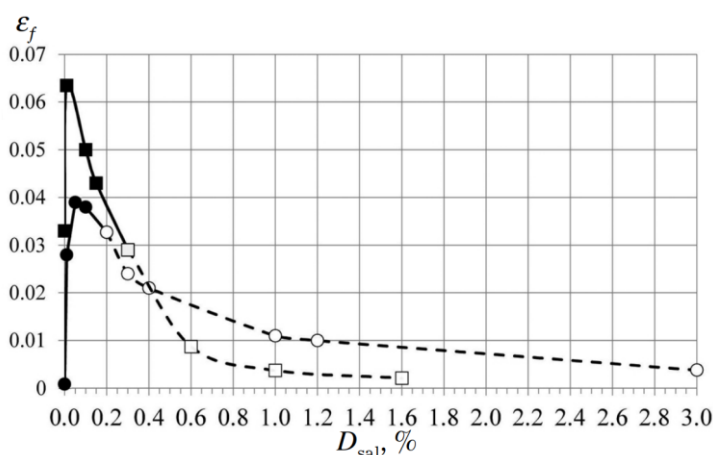


Рисунок 1.16 – Зависимость относительной деформации морозного пучения ε_f от засоленности грунта D_{sal} : при температуре испытаний минус 4 °С (● — песок, ■ — суглинок) и минус 10 °С (○ — песок, □ — суглинок) [22]

Из рисунка видно, что чистый песок (без солей) при промерзании практически не деформируется. При степени засоления хлоридом натрия до 0,1 % проявляются пучинистые свойства песка. При дальнейшем повышении степени засоленности относительная деформация морозного пучения снижается, стремясь асимптотически при D_{sal} более 1,2 % к оси абсцисс. Деформирование суглинка с различной степенью засоления при промерзании аналогично песчаному грунту.

С учетом всего вышесказанного вопрос достоверного определения касательной силы морозного пучения τ_{fh} мерзлых грунтов, засоленных в результате массопереноса при устройстве буровых свай, также является актуальной задачей для будущих исследований.

Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования

Анализ вопросов тепло- и массообмена между материалом буровых свай и многолетнемерзлым грунтом, а также существующей методики расчета несущей способности свай позволил сделать следующие выводы.

1. Для обеспечения твердения материала буровых свай в многолетнемерзлых грунтах используются противоморозные или комплексные химические добавки. При устройстве таких свай наблюдается тепло- и массоперенос, приводящий к засолению и снижению несущей способности основания.

2. Ранее разработано решение, исключающее засоление многолетнемерзлых грунтов под пятой сваи, которое заключается в использовании защитного слоя из бетона, щебня или цемента. Таким образом, нерешенной остается задача определения предельно длительного сопротивления сдвигу искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтов на боковой поверхности сваи.

3. С учетом изложенного целью диссертационной работы является совершенствование методики определения несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах.

Для достижения цели поставлены следующие основные задачи исследования:

- выполнить аналитический обзор научно-технической, методической и нормативной литературы, затрагивающей вопросы теплообмена и массообмена между бетоном буровых свай, изготовленных с применением комплексной химической добавки, и многолетнемерзлым грунтом, а также методы расчета несущей способности и способы их устройства;
- провести комплекс лабораторных исследований по изучению механизмов и закономерностей изменения степени засоленности и предельно длительного сопротивления сдвигу мерзлых грунтов при устройстве буровых свай при различных температурах основания;

- выполнить расчетно-теоретическое исследование времени замерзания и степени засоленности грунтов основания буровой сваи после ее устройства;
- усовершенствовать методику определения несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах;
- выполнить апробацию усовершенствованной методики путем сравнения расчетных значений со значениями, полученными по результатам статических испытаний натурных свай.

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как показано в главе 1, неопределенность и вариация предельно длительного сопротивления сдвигу искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтов на боковой поверхности буровой сваи при определении ее несущей способности определяется интенсивностью массообмена между строительным раствором и грунтом. В свою очередь массообмен определяется значительным количеством различных факторов, включая температурные условия.

Учитывая вышесказанное, по мнению автора, подход к определению коэффициента γ_{sh} должен быть уточнен, так как единое значение коэффициента надежности не учитывает многообразие факторов, влияющих на величину расчетного сопротивления сдвигу искусственно засоленного грунта.

Для подтверждения этого выполнена валидация существующей методики [13] по данным [105], результаты которой представлены на Рисунке 2.1.

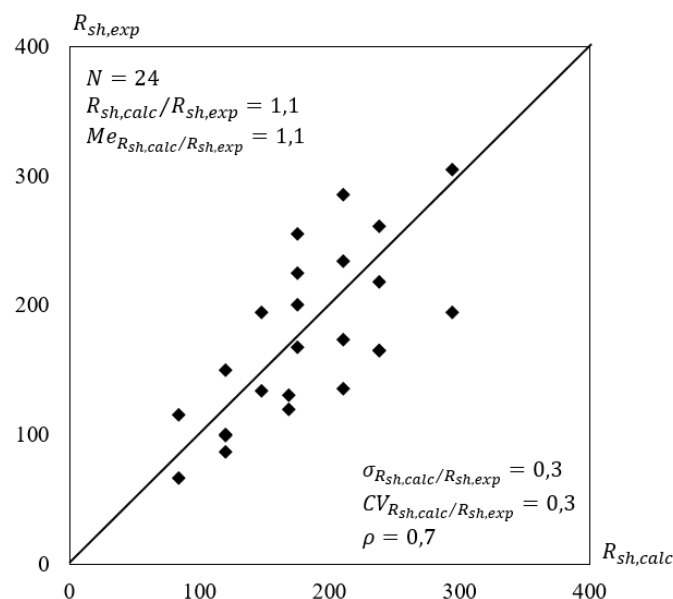


Рисунок 2.1 – Валидация методики определения сопротивления грунтов сдвигу

Результаты подтверждают, что использование единого значения коэффициента условий работы для определения несущей способности сваи не обеспечивает достаточную достоверность определения сопротивления сдвигу, общая погрешность расчета составляет порядка 10 % при коэффициенте вариации

более 0,3. Единичные значения отношений расчетного и опытного значений могут превышать 1,5.

Таким образом, усовершенствование методики принято осуществить путем определения множества значений коэффициента для различных факторов, оказывающих влияние на величину сопротивления сдвигу. Коэффициент условий работы есть не что иное, как отношение расчетных значений сопротивления сдвигу искусственно засоленного и незасоленного грунтов.

Для получения этих отношений при разработке методологии экспериментальных исследований определялись методы испытаний для определения предельно длительного сопротивления сдвигу мерзлого грунта, предельно длительного сопротивления основания одиночной сваи, температуры бетона и грунта, концентрации порового раствора и степени засоленности грунта.

В рамках работы принято использовать стандартизированные методики определения характеристик грунтов, основанные на методах теории предельных состояний и ползучести грунтов, с разработкой способа подготовки образцов для определения предельно длительного сопротивления сдвигу искусственно засоленного грунта, а также методы статистической обработки результатов испытаний.

2.1. Методы лабораторных исследований

Предельно длительное значение сопротивления сдвигу мерзлого грунта по поверхности смерзания с бетоном сваи R_{sh} определяется путем проведения испытаний на одноплоскостной срез [4] на приборах с фиксированной плоскостью среза, разработанных Садовским А.В. [109]. К образцу грунта, смороженного с образцом фундамента или грунтовым раствором, прикладывается срезающая нагрузка при одновременном нагружении образца нагрузкой, нормальной к плоскости среза при заданной температуре испытаний. Конструкция прибора для проведения испытаний на одноплоскостной срез представлена на Рисунке 2.2.

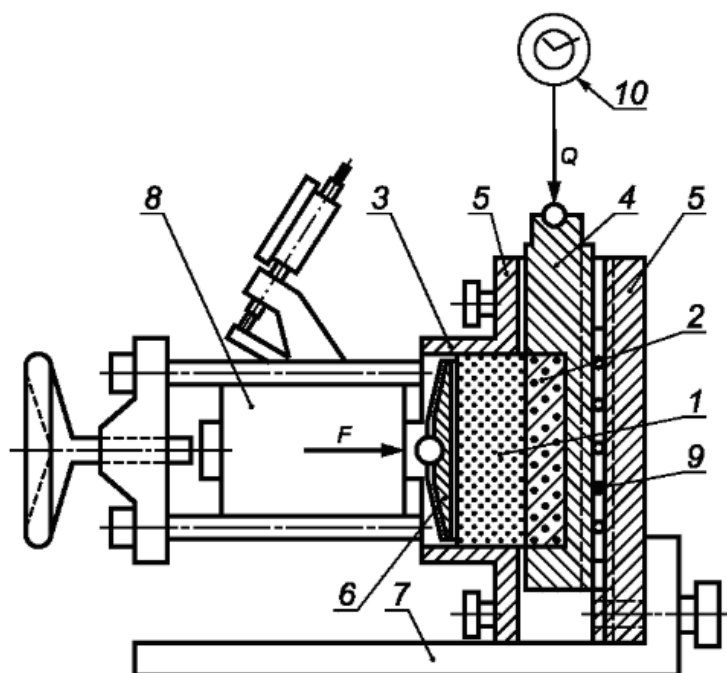


Рисунок 2.2 – Конструкция прибора для проведения испытаний грунтов на одноплоскостной срез: 1 — мерзлый грунт; 2 — материал; 3 — рабочее кольцо; 4 — срезная каретка; 5 — корпус прибора; 6 — боковой штамп; 7 — опорная плита; 8 — динамометр; 9 — обойма шариков; 10 — индикатор часового типа; Q — вертикальная нагрузка; F — горизонтальная нагрузка [4]

Для расчета коэффициента условий работы требовалось впервые определить предельно длительные значения сопротивления сдвигу мерзлого глинистого и песчаного грунтов, засоленных в результате устройства буровой сваи с использованием комплексной химической добавки на основе формиата натрия. Для определения таких значений разработан оригинальный способ подготовки образцов [21]. Ранее схожие данные, но без специальной пробоподготовки определялись другими авторами для добавок на основе хлорида кальция, нитрата натрия, нитрита кальция и других [105].

Для испытаний использовались грунты нарушенного сложения. Подготовка образцов для проведения испытаний включала следующие операции:

- заполнение стального кольца диаметром 71 мм и высотой 35 мм грунтовой пастой с заданными параметрами плотности и влажности;
- замораживание грунта при постоянной отрицательной температуре в морозильной камере (от минус 1 до минус 6 °C с шагом в 1 °C);

- установку на образец стального кольца диаметром 71 мм и высотой 10 мм и его заполнение цементным раствором, изготовленным с применением комплексной химической добавки; температура раствора составляла 20 °С;
- замораживание образцов при заданной температуре (см. Рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Общий вид образцов для испытаний на одноплоскостной срез

Подготовленные образцы устанавливались и закреплялись в приборах. Первоначально к образцам прикладывалась нормальная нагрузка, равная 100 кПа, а затем первая ступень срезающей нагрузки. Испытания проводились в статическом режиме. По результатам определялась засоленность грунтов.

Всего проведено 44 испытания. Для определения зависимости предельно длительного сопротивления искусственно засоленных мерзлых грунтов от температуры испытания проведено по два испытания при шести отрицательных температурах, для глинистого и песчаного грунта. Проведено восемь дополнительных испытаний для определения степени влияния времени выдержки образцов в камере на величину сопротивления грунтов сдвигу.

Также для разработки способа устройства буровой сваи, обеспечивающего набор прочности бетона без электропрогрева и минимизирующего (исключающего) возможность засоления контактного слоя многолетнемерзлого грунта ее основания, проведены испытания грунтов, покрытых гидроизоляционным материалом (жидкой резиной), на одноплоскостной срез при температуре минус 1,5 °С. Проведено 12 испытаний при заливке раствора на грунт сразу после покрытия гидроизоляционным материалом и при выдержке гидроизоляции в течение 24 часов.

Подготовка образцов для проведения испытаний с гидроизолирующим материалом включала следующие операции:

- заполнение стального кольца диаметром 71 мм и высотой 35 мм грунтовой пастой с заданными параметрами плотности и влажности;
- замораживание грунта при постоянной заданной отрицательной температуре минус 1,5 °С в морозильной камере;
- нанесение на поверхность мерзлого образца грунта гидроизоляционного материала (жидкой резины);
- установку на образец стального кольца диаметром 71 мм и высотой 10 мм и его заполнение цементным раствором, изготовленным с применением комплексной химической добавки.

Подготавливались образцы двух видов. Различие в подготовке двух видов образцов заключалось в том, что на образцы первого вида раствор заливался сразу после покрытия гидроизоляционным материалом, а на образцы второго вида раствор заливался через 24 часа после покрытия гидроизоляцией.

Для установления поверхности сдвига при нагружении буровой сваи в искусственно засоленном многолетнемерзлом грунте, а также валидации теоретической зависимости степени засоленности грунта от времени и апробации усовершенствованной методики проведены два испытания фрагментов буровых свай диаметром 350 мм в лотках с мерзлым грунтом статической нагрузкой с определением температуры бетона и грунта при их изготовлении и последующим определением степени засоленности грунтов.

Диаметр фрагментов выбран с целью дальнейшего сопоставления результатов лотковых испытаний с полевыми статическими испытаниями натуральных свай, а также с учетом наличия зависимости сопротивления сдвигу от габаритов, установленной Цытовичем Н.А. [124]. Известно, что с увеличением диаметра до 150–200 мм сопротивление сдвигу на контакте со сваей уменьшается, а свыше уже не зависит от него. Габариты лотка подбирались таким образом, чтобы минимизировать их влияние на результаты эксперимента. Диаметр лотка составлял 600 мм, высота — 300 мм.

Активный массообмен бетона с грунтом, как было отмечено ранее при анализе литературы, происходит, когда грунт находится в оттаявшем состоянии, поэтому ключевыми факторами, влияющими на время массообмена, являются начальные температуры бетона и мерзлого грунта. Лотковые испытания в связи с этим проведены для одного типа песчаного грунта, но при двух начальных отрицательных температурах — минус 1 и минус 3 °С как представительные. Температура бетона принята равной 20 °С.

Процесс подготовки лотков для проведения испытаний фрагментов свай состоял из следующих операций:

- в подготовленный лоток устанавливалась опалубка для формирования условной скважины в грунте диаметром 350 мм;
- лоток заполнялся грунтом слоями по 100 мм с уплотнением с заданными параметрами плотности и влажности [8];
- в ходе заполнения емкости в грунт укладывались три термометрических датчика на глубине 150 мм с шагом 50 мм;
- грунт замораживался до заданной температуры;
- после набора грунтом необходимых значений температуры производились распалубка и заполнение внутренней полости бетоном;
- в бетон погружались термометрические датчики с шагом 50 мм на глубину 150 мм, в процессе устройства фрагмента сваи и его твердения измерялась температура с шагом по времени 15 мин. в первые сутки и далее каждый час до восстановления начальной температуры;

- после восстановления заданной начальной температуры грунта (Рисунок 2.2) в дне лотка устраивалось отверстие, равное диаметру фрагмента сваи; лоток с фрагментом сваи устанавливался в раму гидравлического пресса.

Схема лотка для испытания фрагментов свай представлена на Рисунке 2.4. Общий вид лотка приведен на Рисунке 2.5.

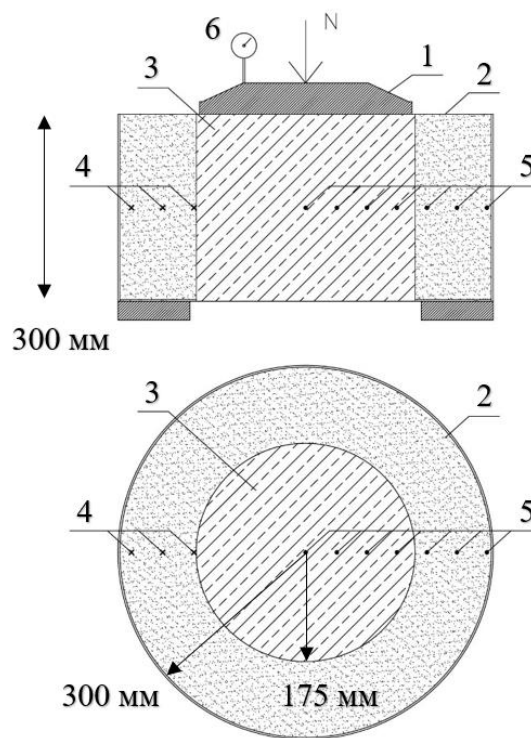


Рисунок 2.4 – Схема лотка для испытания фрагментов буровых свай: 1 — штамп для передачи нагрузки; 2 — мерзлый грунт; 3 — фрагмент сваи; 4 — места отбора образцов грунта для определения степени засоленности; 5 — температурный датчик; 6 — индикатор часового типа

Далее с целью определения несущей способности фрагмента по боковой поверхности F_u проводилось испытание статической нагрузкой в соответствии со стандартной методикой для проведения испытаний свай [2]. Нагрузка рассчитывалась по значениям расчетного сопротивления мерзлого грунта сдвигу по грунту или грунтовому раствору R_{sh} , кПа [13].



Рисунок 2.5 – Общий вид лотка для проведения испытания фрагмента сваи

В результате испытаний предельно длительное сопротивление искусственно засоленного мерзлого грунта сдвигу определялось по формуле:

$$R_{sh} = \frac{F_u}{A_{sh}}, \quad (2.1)$$

где A_{sh} — площадь поверхности смерзания мерзлого грунта с боковой поверхностью фрагмента буронабивной сваи.

В Таблице 2.1 приведены значения нагрузок по ступеням, принятые для проведения статических испытаний фрагментов свай, изготовленных с применением комплексной добавки.

Таблица 2.1 – Нагрузки на фрагменты свай при лотковых испытаниях

Начальная температура грунта, °С	Нагрузка, кН						
	1 ст. (20 %)	2 ст. (40 %)	3 ст. (60 %)	4 ст. (70 %)	5 ст. (80 %)	6 ст. (90 %)	7 ст. (100 %)
Минус 1	10,1	20,2	30,3	35,3	40,4	45,4	50,5
Минус 3	17,8	35,6	53,5	62,4	71,3	80,2	89,1

По завершении статических испытаний лотки с фрагментами свай в мерзлом грунте разрезались напополам с целью отбора образцов для определения влажности и степени засоленности грунта, а также с целью определения поверхности, по которой произошел сдвиг свай. Степень засоленности грунтов определялась кондуктометрическим методом в соответствии с [9].

С целью дальнейшего сопоставления результатов лабораторных и полевых исследований все перечисленные выше испытания проводились для грунтов с заданными значениями физических характеристик, которые определялись в соответствии с действующей нормативной документацией [1, 5, 8]. Физические свойства мерзлых грунтов представлены в Таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Физические свойства мерзлых грунтов

Наименование грунта	W , %	W_L , %	W_P , %	ρ , г/см ³	ρ_d , г/см ³	$\rho_{d, \text{ср}}$, г/см ³	e , д. ед.	S_r , д. ед.
Суглинок легкий, мягкопластичный	18,0	21,0	13,0	1,8	1,5	2,7	0,8	0,6
Песок средней крупности, влажный	17,0	-	-	2,1	1,8	2,7	0,5	0,8

Разновидности грунтов приняты в качестве представительных в связи с их широким распространением в криолитозоне России.

2.2. Методы полевых исследований

Для дальнейшей апробации усовершенствованной методики определения несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах, а также определения температуры бетона и грунта и валидации результатов расчетного-теоретического исследования проведены испытания натурных свай статическими ступенчато возрастающими

вдавливающими нагрузками [24]. Статические испытания проводились на опытной площадке в городе Якутске в августе — ноябре 2020 г.

В соответствии с принятой методикой испытания свай проводились до срыва, исходя из условия, что нагрузка должна быть доведена до значения, при котором на данной ступени нагружения не происходит условной стабилизации деформации. Испытание на этой ступени нагружения заканчивается после достижения значения осадки, не менее чем в три раза превышающего значение осадки на предыдущей ступени, при общей осадке не менее 25 мм [2].

Проведены испытания четырех буронабивных свай, по две сваи диаметрами 350 и 500 мм. Различные диаметры свай приняты для дальнейшей проверки сходимости результатов расчетов с опытными данными в связи с тем, что значения коэффициента условий работы зависят как от начальной температуры грунта, так и от объема бетона, то есть диаметра сваи. Выбор диаметров обусловлен дальнейшей необходимостью сопоставления результатов испытаний с теоретическими данными и небольшим временем вмерзания свай.

Заглубление в грунты испытываемых свай принято от 4 до 6 м для определения степени влияния длины на общую несущую способность свай. Для передачи нагрузок при проведении испытаний статическими вдавливающими нагрузками разработан испытательный стенд. Испытуемые сваи устраивались без армирования, а анкерные с армированием. Армирование анкерных свай необходимо для крепления упорной балки испытательного стенда. План расположения свай, подлежащих испытанию, представлен на Рисунке 2.6.

Температуры многолетнемерзлого грунта и бетона свай измерялись в вертикальных термометрических трубках диаметром 57×3,5 мм во избежание конвекции воздуха [7]. Пять термометрических трубок располагались следующим образом. Одна трубка вне буронабивных свай для контроля температуры грунтов в естественном состоянии, две в центре свай и две по краям на контакте с грунтом.



Рисунок 2.6 – План расположения испытываемых свай

Многолетнемерзлое основание площадки, достаточно однородное по глубине, слагалось в основном песчаным грунтом. Температуры грунтов на глубинах от 2 до 10 м составляли от плюс 1 °С до минус 3 °С. Физические характеристики грунтов основания площадки представлены в Таблице 2.3 и на Рисунке 2.7.

Таблица 2.3 – Физические характеристики грунтов основания площадки

№ п/п	Глубина, м	Влажность W_{tot} , д. ед.	Плотность грунта, г/см ³			Степень засоленности D_{sal} , %	Наименование грунта
			ρ_s	ρ	ρ_d		
1	–2,0	0,25	2,66	1,83	1,78	0,025	Песок мелкий
2	–3,0	0,21	2,66	1,98	1,93	0,026	Песок средней крупности
3	–4,0	0,37	2,66	1,87	1,80	0,157	Песок пылеватый
4	–5,0	0,24	2,66	1,87	1,83	0,009	Песок мелкий
5	–6,0	0,24	2,66	1,89	1,85	0,009	Песок мелкий
6	–7,0	0,25	2,66	1,94	1,89	0,008	Песок средней крупности
7	–8,0	0,23	2,66	1,94	1,90	0,006	Песок средней крупности
8	–9,0	0,2	2,66	1,92	1,88	0,006	Песок средней крупности
9	–10,0	0,31	2,66	1,82	1,78	0,010	Песок мелкий

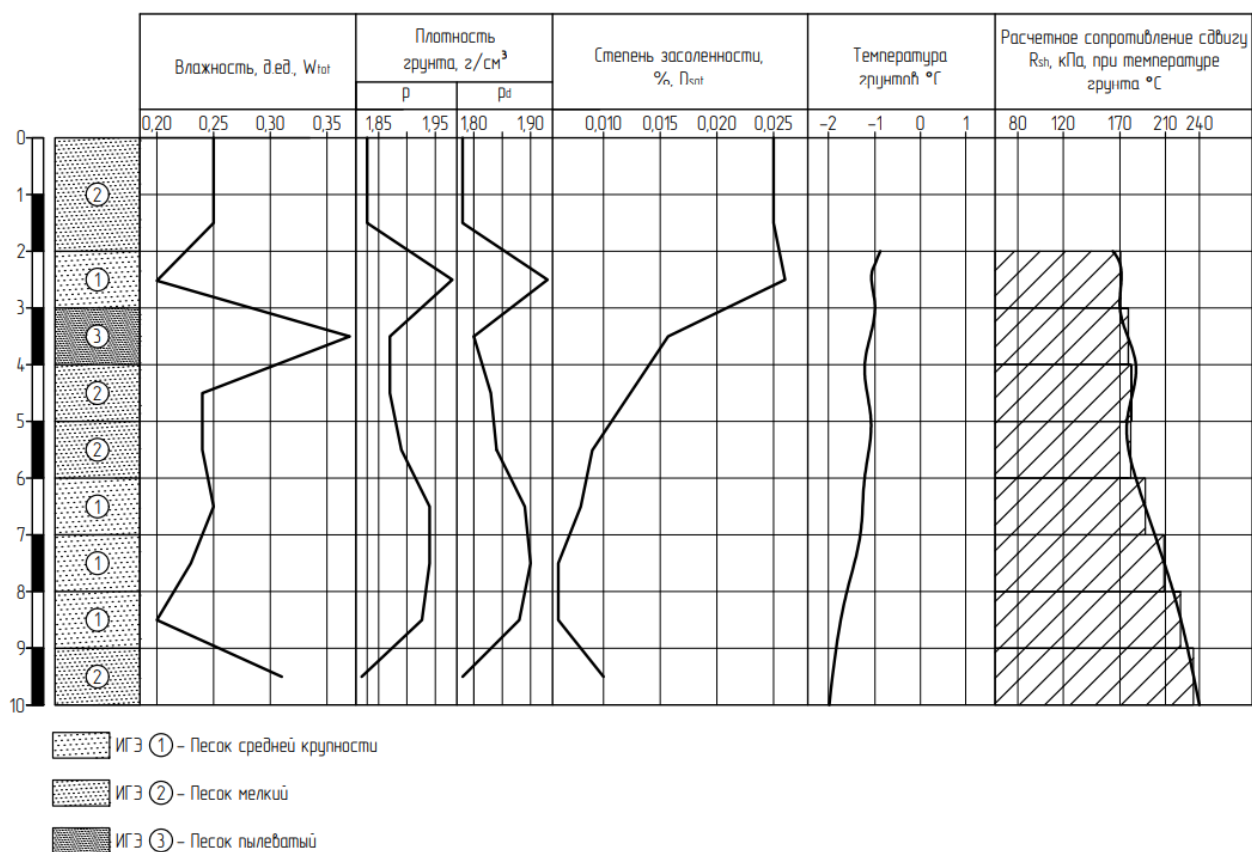


Рисунок 2.7 – Характеристики грунтов основания опытной площадки

Процесс устройства натуральных буронабивных свай включал следующие этапы:

- разбивка опытной площадки;
- бурение скважин под сваи на глубину на 0,5 м больше заданной длины сваи для устройства щебеночной подушки, исключающей массообмен бетона с грунтом;
- погружение обсадных труб на 0,5 м глубже слоя сезонного оттаивания грунта для исключения осыпания стенок скважины;
- устройство в скважинах подушек из щебня мощностью 0,5 м (для испытываемых свай);
- погружение арматурного каркаса (для анкерных свай);
- погружение в скважину термометрических трубок;
- заполнение скважин бетоном с комплексной химической добавкой методом свободного сброса;

- измерение температуры в теле сваи в процессе заполнения скважины и дальнейшего твердения.

Процесс устройства буронабивной сваи и общий вид готовой сваи с термометрической трубкой представлен на Рисунке 2.8. После восстановления естественного температурного состояния многолетнемерзлых пород осуществлялись подготовка и монтаж испытательных стендов. На анкерные сваи монтировались балки и приваривались к выпускам арматурных каркасов (см. Рисунок 2.9).



Рисунок 2.8 – Процесс устройства буронабивной сваи и готовая свая с термометрической трубкой

В Таблице 2.4 приведены значения нагрузок по ступеням, принятые для проведения статических испытаний натуральных буровых свай, изготовленных с применением комплексной химической добавки, различных диаметров. Максимальная величина нагрузки определена расчетом и равна предельно длительному сопротивлению основания одиночной сваи, изготовленной без применения химических добавок.



Рисунок 2.9 – Общий вид стенда для проведения испытаний свай

Таблица 2.4 – Нагрузки по ступеням при полевых испытаниях свай

Диаметр свай, мм	Длина, м	Нагрузка, кН						
		1-я ступень (20 %)	2-я ступень (40 %)	3-я ступень (60 %)	4-я ступень (70 %)	5-я ступень (80 %)	6-я ступень (90 %)	7-я ступень (100 %)
Ø350	6,0	307,0	614,0	921,0	1074,5	1228,0	1381,5	1535,0
Ø500	5,0	257,8	515,5	773,3	902,2	1031,0	1159,9	1288,8

Далее на испытываемые сваи устанавливались оголовки и гидравлические домкраты, подключенные в гидравлические системы для создания нагрузок на сваи, устанавливались индикаторы часового типа для измерения осадок в процессе испытания.

2.3. Обработка и анализ результатов исследований

По аналогии с [105] для статистической обработки результатов лабораторных испытаний мерзлых грунтов на одноплоскостной срез использовалась корреляционная зависимость, аппроксимирующая опытные данные по сопротивлению грунтов сдвигу линейной функцией от температуры $R_{sh}(\theta)$:

$$R_{sh}(\theta) = a\theta + b, \quad (2.2)$$

где θ — безразмерная температура по Ассуру [40], равная $\theta = T/T^*$;

T — температура, °C;

$T^* = -1$ °C;

a и b — параметры линейной зависимости, которые определяются по формулам:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n R_{sh,i} \theta_i - \sum_{i=1}^n R_{sh,i} \sum_{i=1}^n \theta_i}{n \sum_{i=1}^n (\theta_i)^2 - (\sum_{i=1}^n \theta_i)^2}, \quad (2.3)$$

$$b = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n R_{sh,i} - a (\sum_{i=1}^n \theta_i)^2). \quad (2.4)$$

Для получения коэффициента надежности по грунту определяется среднеквадратическое отклонение предельно длительного сопротивления мерзлого грунта сдвигу от установленной зависимости и коэффициент вариации в соответствии с методикой [5].

Для определения электрической проводимости водных вытяжек X , мСм/см, подготовленных из грунта, отобранного из лотков, первоначально устанавливалась зависимость проводимости от заданной концентрации водного раствора с комплексной добавкой C , % (Рисунок 2.10).

Значения электрической проводимости водных вытяжек, полученные по результатам испытаний грунтов из лотков, корректировались с учетом полученного поправочного коэффициента, определяемого зависимостью проводимости от заданной концентрации.

Для сопоставления и обеспечения воспроизводимости результатов всего комплекса экспериментальных исследований требовалось принять единый состав бетонной смеси с комплексной химической добавкой и его параметры. Параметры тяжелой бетонной смеси, обеспечивающей класс прочности на сжатие В25, марку по морозостойкости F₁₃₀₀ и марку по водонепроницаемости W6, определялись на производственной площадке ООО «БК Топаз» в городе Якутске.

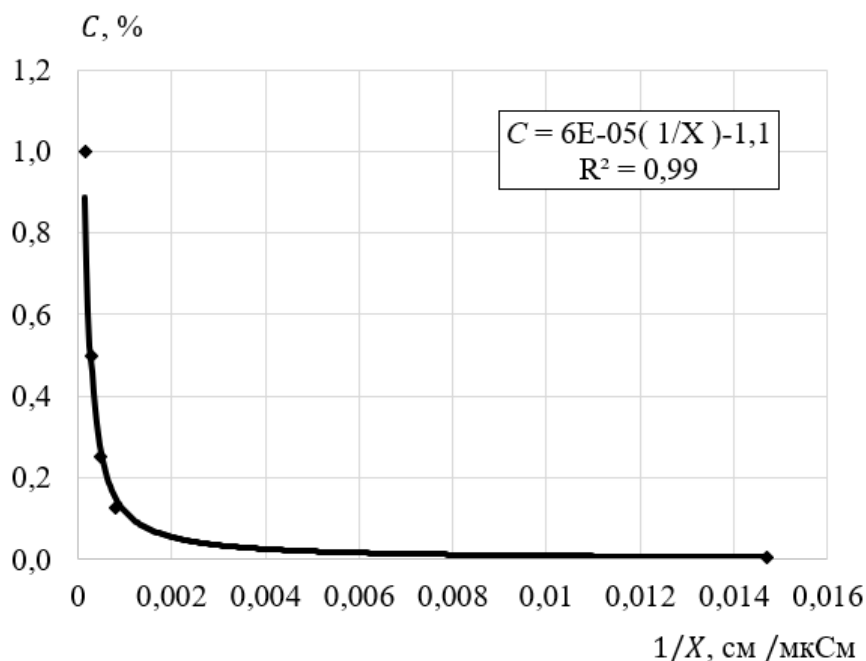


Рисунок 2.10 – Зависимость электрической проводимости водного раствора $1/X$, см/мкСм, от заданной концентрации водного раствора, C , %

При изготовлении буровых свай в многолетнемерзлых грунтах для обеспечения прочности используются портландцементы марок не ниже М500 [107]. В рамках работы в качестве вяжущего материала применялся цемент на основе портландцементного клинкера производителя АО ПО «Якутцемент» ПЦ 500-Д0.

В качестве мелкого заполнителя применялся речной песок мелкий (очень мелкий) Центральной Якутии истинной плотностью 2600–2700 кг/м³, с содержанием пылевидных и глинистых частиц менее 3 %. В качестве крупного заполнителя использовался известняковый щебень фракции 5–20 и средней плотностью 2400–2500 кг/м³. Применение данного щебня для получения бетона повышенной морозостойкости допускается только при условии введения в бетонную смесь воздухововлекающей добавки.

В качестве комплексной добавки использовался состав из формиата натрия (ОАО «Метафракс») в количестве 2 % от массы цемента, в качестве противоморозной составляющей, и полифункциональной воздухововлекающей добавки суперпластификатора ПФМ-НЛК (ООО «Полипласт-УралСиб») в количестве 0,8 % от массы цемента.

Положительный эффект влияния формиата натрия на твердение бетона при отрицательных температурах экспериментально подтвержден в [51]. Формиат натрия не вызывает коррозионной активности металла [68]. Его применение в качестве добавки для обеспечения твердения в контакте с мерзлым грунтом не производит негативного воздействия на экологические свойства грунтов, в отличие от некоторых других солей.

Выбор ПФМ-НЛК связан с необходимостью увеличения подвижности бетонной смеси, а также с его основой, в состав которой входит смесь натриевых солей, и наличием воздухововлекающего и гидрофобизирующего компонентов, обеспечивающих стабильное повышение морозостойкости.

Принят следующий состав бетона на 1 м³:

- цемент — 450 кг;
- песок — 575 кг;
- щебень — 1200 кг;
- вода — 175 л;
- комплексная химическая добавка — 12,5 кг.

Производство работ по устройству буровых свай в многолетнемерзлом грунте производится с соблюдением конкретных требований к таким характеристикам смеси, как начальная температура, удобоукладываемость, плотность, объем вовлеченного воздуха [105]. Значения полученных характеристик смеси приведены в Таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Параметры бетонной смеси при устройстве опытных свай

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Марка по удобоукладываемости	>16,0 см (П4)
2	Средняя плотность бетонной смеси	>2400 кг/м ³
3	Объем вовлеченного воздуха	>4,0 %

Класс прочности бетона назначается на основании результатов расчетов фундаментов на действующие нагрузки, а марки по морозостойкости и

водонепроницаемости — исходя из условий эксплуатации. Требуемая марка бетона по морозостойкости назначается для участка конструкции, наиболее подверженного увлажнению и замораживанию, который для свайных фундаментов соответствует слою сезонного промерзания — оттаивания.

В соответствии с действующими нормативными требованиями [13, 14] бетон В25 F₁₃₀₀ W6 может применяться при расчетной зимней температуре наружного воздуха до минус 40 °С включительно, в условиях отсутствия минерализации подземных вод.

Выводы по главе 2

Несущая способность сваи по боковой поверхности определяется предельно длительным сопротивлением грунта сдвигу, которое при устройстве буровых свай, изготовленных с применением химических добавок, определяется степенью засоленности, изменяющейся во времени, в зависимости от вида добавки, габаритов сваи, начальных температур раствора и основания, физических, теплофизических и механических свойств грунтов.

Анализ методов проведения испытаний позволил сформулировать следующие выводы по методологии экспериментальных исследований.

1. Показано, что использование единого значения коэффициента условий работы для определения несущей способности сваи не обеспечивает достаточную достоверность определения сопротивления сдвигу. Общая погрешность расчета составляет порядка 10 % при коэффициенте вариации более 0,3. Единичные значения отношений расчетного и опытного значений могут превышать 50 %. Усовершенствование методики принято осуществить путем определения множества значений коэффициента для различных начальных условий. Коэффициент условий работы определить как отношение расчетных значений сопротивления сдвигу искусственно засоленного и незасоленного грунтов.

2. Для изучения предельно длительного сопротивления сдвигу искусственно засоленных мерзлых грунтов проведены испытания на одноплоскостной срез глинистого и песчаного грунтов на приборах с фиксированной плоскостью среза, разработанных Садовским А.В. [109]. Определено, что стандартная методика подготовки образцов не позволяет оценить снижение прочности грунта за счет повышения степени засоленности. Поэтому для испытаний разработан новый способ подготовки образцов, предложенный автором. Цементный раствор с комплексной добавкой при положительной температуре заливался на заранее подготовленный мерзлый грунт. Далее образец выдерживался при заданной отрицательной температуре. После завершения испытаний определялась степень засоленности грунта.

3. Предложено решение, исключающее засоление многолетнемерзлых грунтов на боковой поверхности буровой сваи. Решение заключается в изоляции поверхности скважины слоем защитного материала, закрывающего поры грунта. Для определения эффективности данного решения также проведены испытания на одноплоскостной срез. В данном случае способ подготовки образцов дополнительно включал нанесение на поверхность мерзлого образца грунта гидроизоляционного материала (жидкой резины).

4. Степень засоленности грунтов на боковой поверхности сваи определяется большим числом факторов, на что было указано выше. Для изучения механизмов и закономерностей изменения степени засоленности мерзлых грунтов при устройстве буровых свай проведены лотковые испытания фрагментов свай статической нагрузкой с измерением температуры в процессе их устройства и степени засоленности грунтов по окончании испытаний.

5. Для апробации усовершенствованной методики расчета несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах проведены полевые испытания натурных свай статической ступенчато возрастающей нагрузкой.

6. Выявлено, что сопротивление искусственно засоленных грунтов сдвигу зависит от состава солей [105], в связи с чем для сопоставления и обеспечения воспроизводимости результатов всего комплекса экспериментальных исследований принят единый состав бетона с комплексной химической добавкой, включающей формиат натрия в качестве противоморозного компонента (2 % от массы цемента) и ПФМ-НЛК в качестве воздухововлекающего и пластифицирующего компонента (0,8 % от массы цемента).

ГЛАВА 3. СОПРОТИВЛЕНИЕ СДВИГУ ИСКУССТВЕННО ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Предельно длительное сопротивление мерзлых грунтов сдвигу зависит от множества факторов. К ним относятся вид грунта, его физические свойства, степень засоленности, нормальное давление, температура, время и другие параметры. Так, результаты исследования Rui Shi [169] показывают зависимость сопротивления сдвигу многолетнемерзлых грунтов от глубины, температуры, времени и количества циклов заморозания — оттаивания. На Рисунке 3.1 приведены графики распределения по глубине сопротивления мерзлых грунтов сдвигу и их температуры на различные моменты времени.

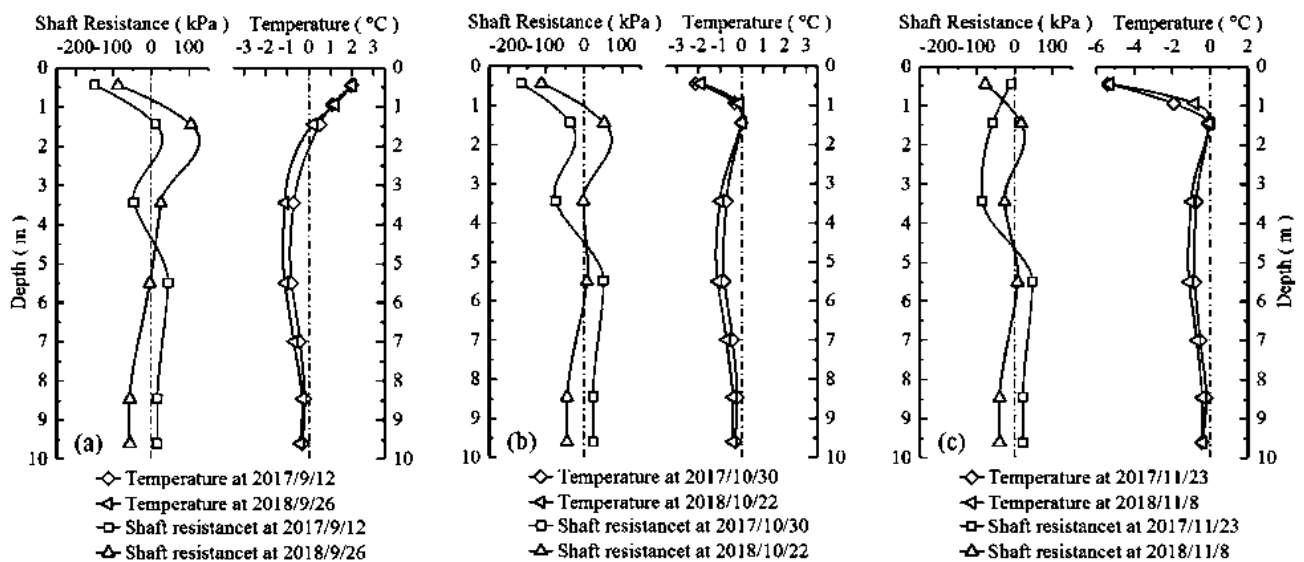


Рисунок 3.1 – Распределение по глубине сопротивления мерзлых грунтов сдвигу и их температуры на различные моменты времени [169]

В рамках диссертационной работы установлены зависимости предельно длительного сопротивления сдвигу мерзлых глинистых и песчаных грунтов, искусственно засоленных в результате устройства буровой сваи, от температуры. Для определения зависимости проведены испытания на одноплоскостной срез в соответствии с описанной ранее методикой.

3.1. Определение сопротивления сдвигу мерзлых грунтов

Результаты испытаний на одноплоскостной срез по поверхности мерзлый грунт — раствор с комплексной добавкой представлены в виде графиков зависимости сопротивления сдвигу мерзлого грунта от температуры (Рисунки 3.2–3.3). На графиках данные проведенных испытаний сопоставлены с табличными значениями R_{sh} [13], а также с теми же значениями при использовании нормативного коэффициента γ_{sh} , равного 0,7.

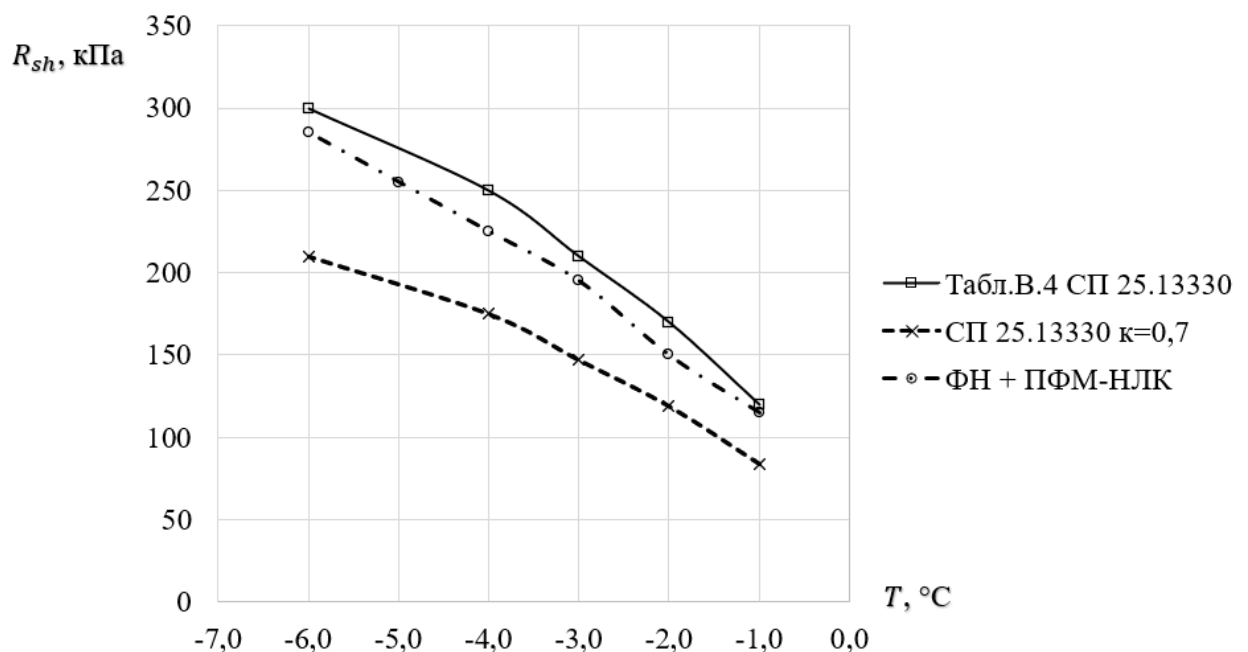


Рисунок 3.2 – Зависимость сопротивления мерзлого суглинка сдвигу на контакте с засоленным бетоном R_{sh} , кПа, от температуры T , °C

Сравнительный анализ результатов испытаний с нормативными значениями сопротивления мерзлого грунта сдвигу в первую очередь показывает, что использование понижающего коэффициента γ_{sh} не позволяет достоверно определить величину искомого параметра. Опытные значения сопротивления мерзлого суглинка сдвигу значительно (порядка 30 %) превышают расчетные значения. Для песка опытное значение ниже расчетного на 15–35 %.

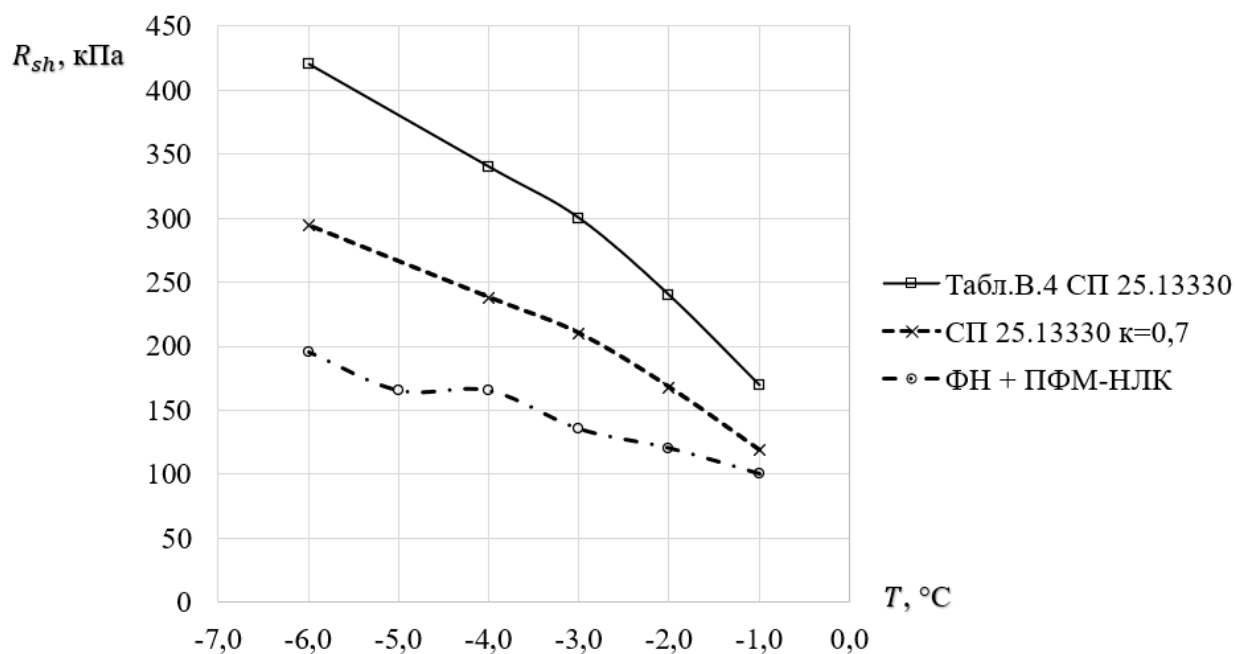


Рисунок 3.3 – Зависимость сопротивления мерзлого песка сдвигу на контакте с засоленным бетоном R_{sh} , кПа, от температуры T , °C

На Рисунке 3.4 представлены результаты валидации методики [13] по опытным данным.

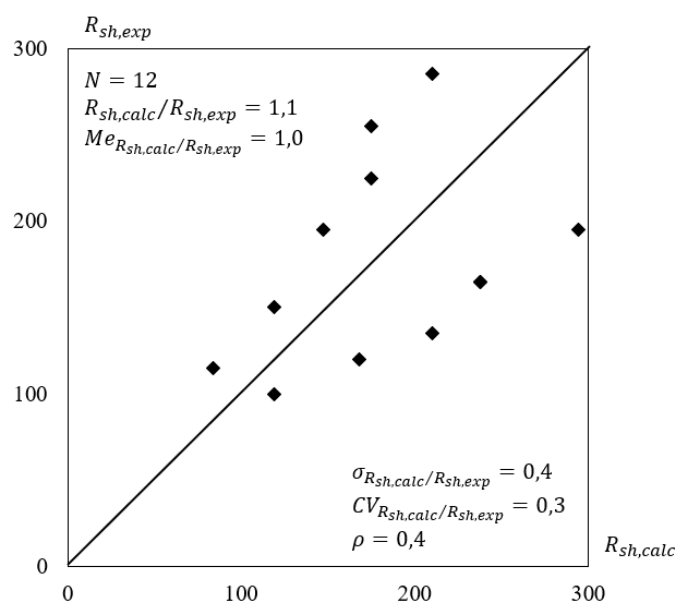


Рисунок 3.4 – Зависимость расчетного $R_{sh,calc}$, кПа, и опытного $R_{sh,exp}$, кПа, значений сопротивления искусственно засоленного мерзлого грунта сдвигу

Результаты валидации по опытным данным, так же, как и по данным [105], показывают, что общая погрешность составляет более 10 % при коэффициенте

вариации более 0,3. Единичные значения отношений могут превышать 1,5, что также показывает недостаточную достоверность методики [13].

На Рисунках 3.5–3.6 представлены графики сопротивления мерзлых грунтов сдвигу по поверхности смерзания с растворами, засоленными различными добавками [105]. Среди добавок для сопоставления с результатами испытаний представлены нитрит натрия (НН) в количестве 3 % от массы цемента и нитрит нитрат хлорид кальция (ННХК) в количестве 5 % от массы цемента.

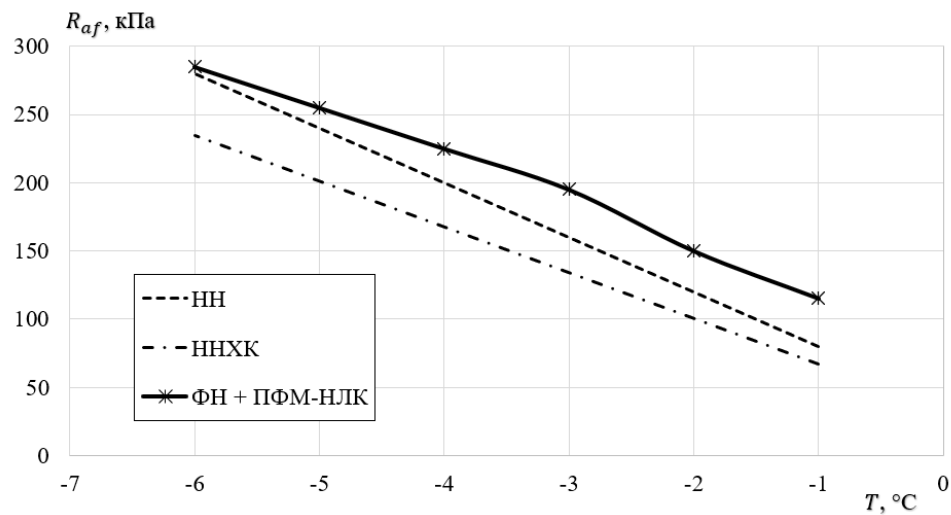


Рисунок 3.5 – Зависимость сопротивления мерзлого глинистого грунта сдвигу по поверхности смерзания с раствором R_{af} , кПа, от температуры T , $^\circ\text{C}$

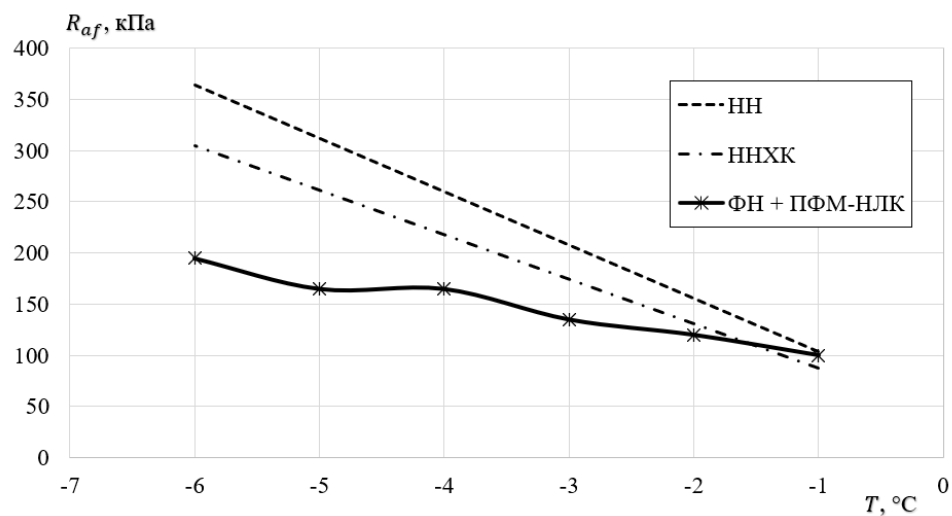


Рисунок 3.6 – Зависимость сопротивления мерзлого песчаного грунта сдвигу по поверхности смерзания с раствором R_{af} , кПа, от температуры T , $^\circ\text{C}$

Из графиков на Рисунках 3.5–3.6 видно, что наибольшая эффективность исследуемой комплексной добавки с точки зрения прочности грунта достигается в пределах интервала температур от минус 1 до минус 2 °С для песчаных грунтов и от минус 1 до минус 3 °С для глинистых грунтов. При более низких отрицательных температурах добавка на основе формиата натрия уступает по эффективности использования исследованным ранее солям, особенно в песчаных грунтах.

Следует отметить, что архивные данные [105] по сопротивлению мерзлого грунта сдвигу по поверхности смерзания с растворами, засоленными НН и ННХК, устанавливают идентичную зависимость изменения прочности от температуры грунта независимо от его типа. Для раствора НН сопротивление мерзлого грунта сдвигу снижается на 20 %, а для раствора ННХК — на 40 %.

Во-первых, данные [105] подтверждают необоснованность использования понижающего коэффициента, равного 0,7. Во-вторых, результаты исследования говорят о различном влиянии засоленного раствора на прочность мерзлого грунта. Это связано с разной скоростью массообменных процессов, происходящих в процессе устройства свай.

В соответствии с данными Маркова Е.В., Пулькикова С.А. и Герберера А.Д. [81], массообмен в грунте осуществляется за счет нескольких основных процессов: фильтрации влаги и диффузии солей. Следовательно, степень снижения прочности мерзлого грунта при устройстве буровой сваи будет определяться величинами коэффициентов фильтрации грунта в оттаявшем состоянии и коэффициента осмотической диффузии.

На Рисунках 3.7–3.8 представлены зависимости сопротивления мерзлых засоленных глинистых и песчаных грунтов сдвигу от температуры, аппроксимированные линейными функциями, а также аналогичные зависимости для незасоленных грунтов, построенные по нормативным данным [13].

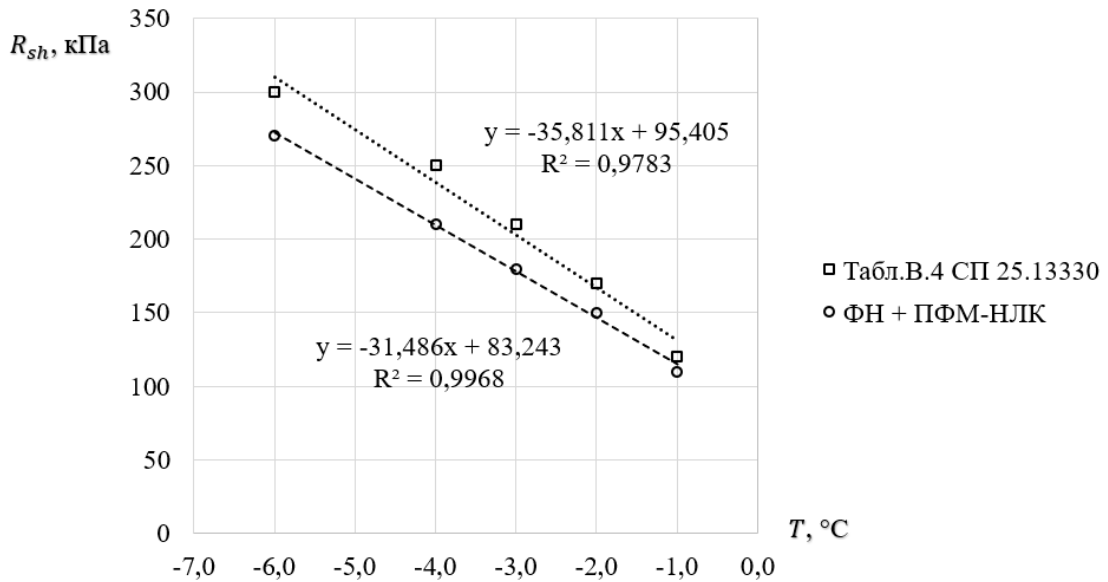


Рисунок 3.7 – Зависимость нормативного сопротивления мерзлого глинистого грунта сдвигу R_{sh} , кПа, от температуры T , °C

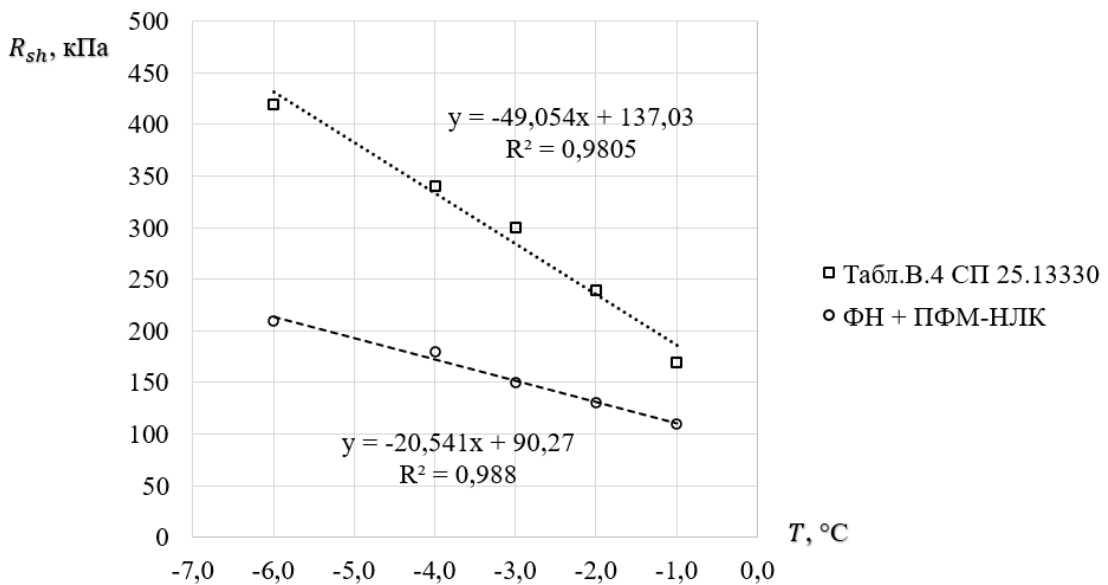


Рисунок 3.8 – Зависимость нормативного сопротивления мерзлого песчаного грунта сдвигу R_{sh} , кПа, от температуры T , °C

Из рисунков видно, что зависимости для глинистого и песчаного грунтов расходятся при снижении температуры испытания. В большей степени это наблюдается в песчаном грунте. Увеличение расхождения в значениях сопротивления сдвигу может быть связано с методикой подготовки образцов и процессами, проходящими при взаимодействии раствора с мерзлым грунтом.

Из анализа литературы известно, что скорость массообменных процессов между раствором и грунтом имеет прямую зависимость от времени [76]. При снижении температуры их скорость снижается, поэтому причиной расхождения значений в зависимостях может являться именно время замерзания грунта.

На Рисунке 3.9 в виде графиков зависимости деформации сдвига образца от времени представлены результаты испытаний, проведенных для разработки способа устройства буровых свай.

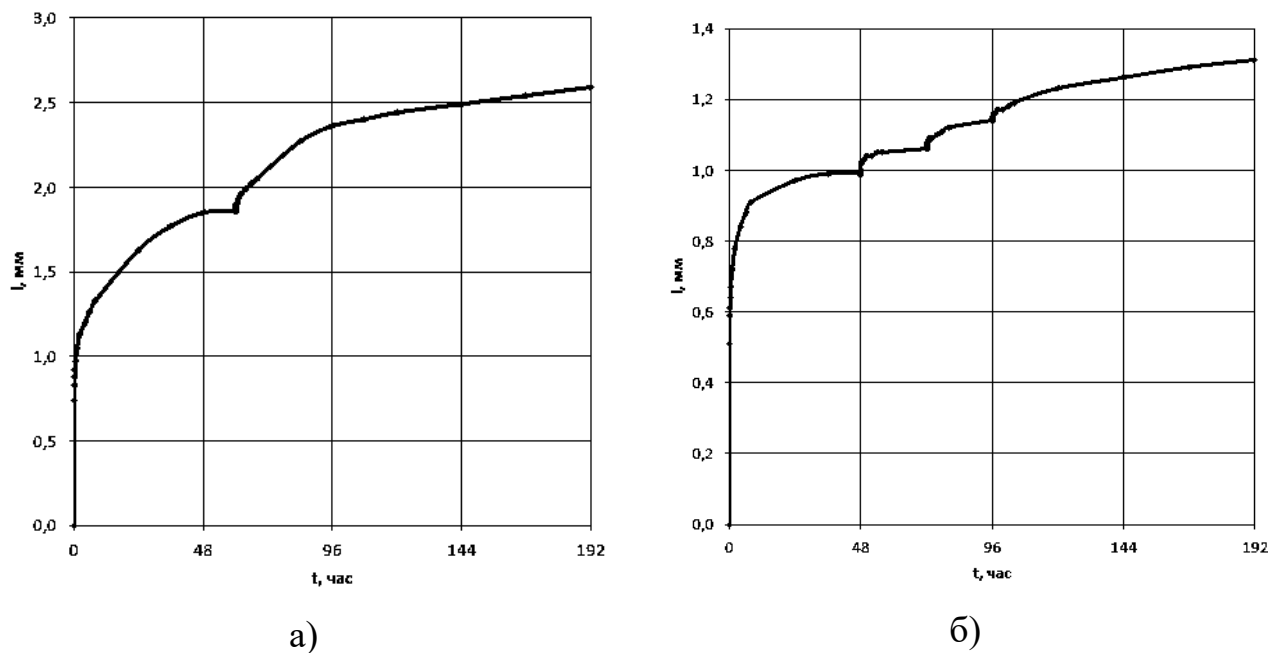


Рисунок 3.9 – Зависимости деформации сдвига образца l , мм, от времени t , ч: а — заливка через 24 часа после гидроизоляции; б — сразу после гидроизоляции

В результате испытаний получено, что сопротивление сдвигу двух видов образцов различно. При заливке раствора на грунт сразу после покрытия гидроизоляционным материалом сопротивление сдвига составляет 110 кПа, а при выдержке гидроизоляции в течение 24 часов — 70 кПа.

По завершении испытаний выполнен анализ характера взаимодействия материалов между собой и выявлены поверхности произошедшего среза (см. Рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Характер взаимодействия мерзлого грунта, слоя гидроизоляции и цементного раствора, изготовленного с комплексной химической добавкой: 1 — заливка через 24 часа после гидроизоляции; 2 — сразу после гидроизоляции

Из Рисунка 3.10 видно, что при заливке раствора сразу после нанесения гидроизоляции на образец происходит процесс закупорки грунта, явной прослойки гидроизоляции не возникает. При заливке раствора по истечении 24 часов после нанесения гидроизоляции между раствором и грунтом возникает пленка отвердевшей гидроизоляции, снижающая сопротивление сдвигу. Значения, полученные при заливке раствора сразу после нанесения гидроизоляции на образец, позволяют повысить сопротивление сдвигу в 1,2–1,3 раза по сравнению с искусственно засоленными образцами.

3.2. Статистическая обработка результатов испытаний

В рамках статистической обработки результатов испытаний мерзлых грунтов на одноплоскостной срез получены линейные зависимости расчетного сопротивления сдвигу глинистого и песчаного грунтов на контакте с засоленным раствором $R_{sh,sal}$ от температуры θ :

$$R_{sh,sal,глинистого}(\theta) = -31,4\theta + 83,3; \quad (3.1)$$

$$R_{sh,sal,песчаного}(\theta) = -19,4\theta + 92,0. \quad (3.2)$$

Зависимости также представлены графически на Рисунке 3.11.

Коэффициенты надежности по грунту при доверительной вероятности $\alpha=0,85$ для глинистого и песчаного грунтов составили 1,01 и 1,02 соответственно.

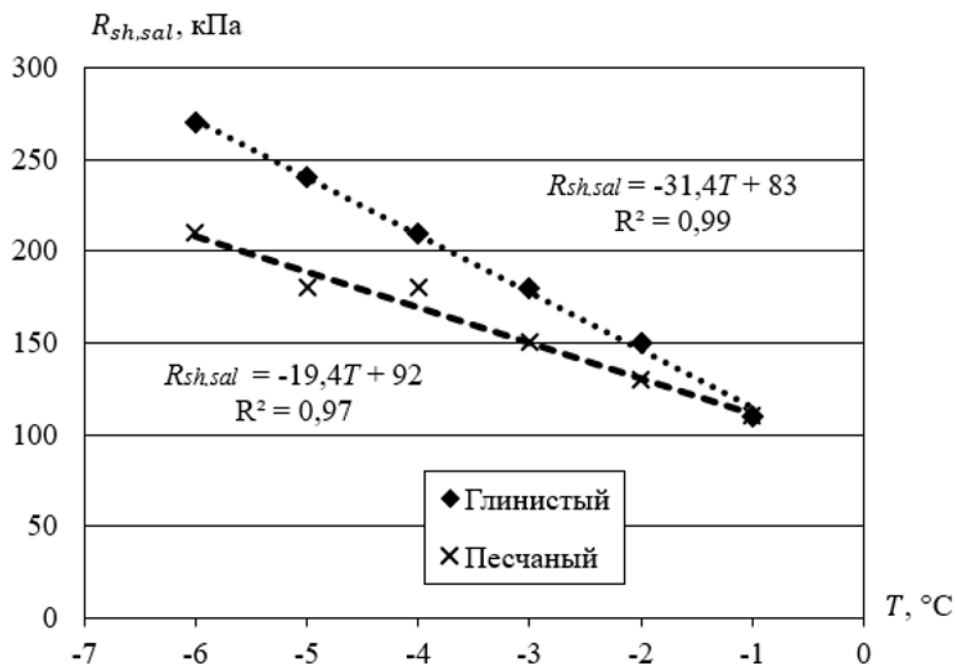


Рисунок 3.11 – Зависимости предельно-длительного сопротивления мерзлого песчаного и глинистого грунта сдвигу $R_{sh,sal}$ от температуры T

Далее требовалось определить степень засоленности грунтов. В главе 1 и на Рисунке 3.12 показано, что зависимость сопротивления сдвигу от степени засоленности грунта может быть удовлетворительно аппроксимирована

логарифмическими или экспоненциальными функциями. Поэтому далее с помощью регрессионного анализа нормативных данных [13] построена зависимость сопротивления сдвигу искусственно засоленного грунта от следующих факторов:

- X_1 — степень засоленности грунта D_{sal} , %.
- X_2 — безразмерная температура грунта вокруг сваи, θ .

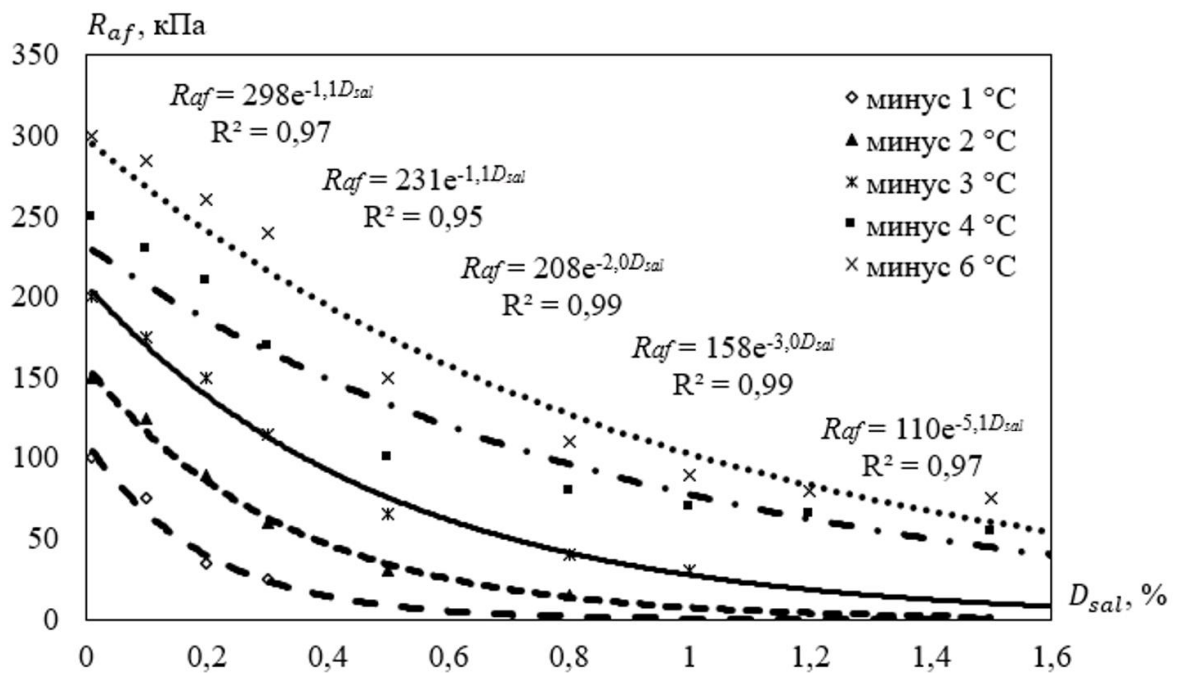


Рисунок 3.12 – Зависимость сопротивления грунта сдвигу по поверхности смерзания с бетоном R_{af} , кПа, от степени засоленности D_{sal} , %, по данным [20]

Для анализа принято уравнение следующего вида:

$$Y = e^{(A + BX_1 + CX_2)}, \quad (3.3)$$

где Y — расчетное сопротивление мерзлого засоленного грунта с континентальным типом засоления сдвигу R_{af} , кПа.

Для применения метода наименьших квадратов и нахождения неизвестных коэффициентов A , B и C регрессия (3.3) преобразована к линейному виду путем логарифмирования

$$\ln Y = A + BX_1 + CX_2 \quad (3.4)$$

и замены переменных

$$Y' = A + BX_1 + CX_2. \quad (3.5)$$

Значения входных параметров приведены в Таблице 3.1.

С помощью метода наименьших квадратов определено, что значения коэффициентов для глинистого грунта составляют $A = 3,8$; $B = -1,2$; $C = 0,43$. Для песчаного грунта значения коэффициентов составляют $A = 4,3$; $B = -2,5$; $C = 0,35$.

Таким образом зависимости имеют вид:

$$R_{af,sal, \text{глинистого}} = e^{(3,8 - 1,2D_{sal} + 0,43\theta)}; \quad (3.6)$$

$$R_{af,sal, \text{песчаного}} = e^{(4,3 - 2,5D_{sal} + 0,35\theta)}. \quad (3.7)$$

Выполненная проверка адекватности показала статическую значимость уравнений. Установлено, что не менее 95 % общей вариабельности функции $R_{af}(D_{sal}, \theta)$ объясняется изменением факторов X_1 и X_2 .

С использованием уравнений (3.1) и (3.2) определены отношения полученных расчетных величин сопротивления мерзлых грунтов, засоленных в результате устройства буровой сваи, сдвигу к расчетным значениям незасоленных грунтов, приведенным в [13]. Отношение $R_{sh,sal}/R_{sh}$ для глинистого грунта составило 0,87, а для песчаного грунта — 0,52.

Таблица 3.1 – Входные параметры уравнений регрессии

Суглинки				Пески мелкие и средние			
Y	X_1	X_2	Y'	Y	X_1	X_2	Y'
100	0,01	1,0	4,61	130	0,01	1,0	4,87
60	0,10	1,0	4,09	70	0,20	1,0	4,25
30	0,20	1,0	3,40	50	0,50	1,0	3,91
25	0,30	1,0	3,22	40	0,75	1,0	3,69
20	0,50	1,0	3,00	30	1,00	1,0	3,40
150	0,01	2,0	5,01	200	0,01	2,0	5,30
100	0,10	2,0	4,61	110	0,20	2,0	4,70
50	0,20	2,0	3,91	80	0,50	2,0	4,38
45	0,30	2,0	3,81	70	0,75	2,0	4,25
40	0,50	2,0	3,69	50	1,00	2,0	3,91
200	0,01	3,0	5,30	260	0,01	3,0	5,56
130	0,10	3,0	4,87	150	0,20	3,0	5,01
90	0,20	3,0	4,50	110	0,50	3,0	4,70
80	0,30	3,0	4,38	90	0,75	3,0	4,50
70	0,50	3,0	4,25	80	1,00	3,0	4,38
250	0,01	4,0	5,52	330	0,01	4,0	5,80
180	0,10	4,0	5,19	190	0,20	4,0	5,25
120	0,20	4,0	4,79	140	0,50	4,0	4,94
110	0,30	4,0	4,70	120	0,75	4,0	4,79
100	0,50	4,0	4,61	100	1,00	4,0	4,61

С помощью полученных отношений выполнена корректировка уравнений (3.6) и (3.7) для расчетного сопротивления грунта сдвигу $R_{sh,sal}$, кПа, искусственно засоленного комплексной химической добавкой, принятой в работе:

$$R_{sh,sal,глинистого} = e^{(4,8 - D_{sal} + 0,1\theta)}; \quad (3.8)$$

$$R_{sh,sal,песчаного} = e^{(4,9 - 1,55D_{sal} + 0,2\theta)}. \quad (3.9)$$

Полученные уравнения позволяют определить расчетное сопротивление искусственно засоленного грунта сдвигу на боковой поверхности буровых свай в зависимости от степени засоленности грунта и температуры [62]. С использованием уравнений определено, что степень засоленности образцов грунта, испытанных на одноплоскостной срез, составила 0,06 % для суглинка и 0,23–0,32 % для песка.

Результаты показывают, что установившаяся на момент замерзания грунта степень засоленности, определяющая сопротивление сдвигу, зависит от вида и физических свойств грунта и времени его замерзания.

Вид и физические свойства грунта определяют скорость массообмена. Диффузионный массообмен [76] определяется такими физическим свойствам грунта, как естественная плотность и плотность сухого грунта, влажность (влажность за счет незамерзшей воды в мерзлом грунте), коэффициенты пористости и извилистости пор, степень водонасыщения.

Для буровых свай, изготовленных в многолетнемерзлых грунтах, время замерзания определяется габаритами свай, начальной температурой, физическими и теплофизическими свойствами раствора и грунта [108]. При замерзании грунта основания свай массообмен продолжается за счет диффузии при наличии в порах незамерзшей воды, однако снижается его скорость. Конвективная часть переноса ионов солей прекращается [77].

Учитывая тот факт, что предельно длительное сопротивление сдвигу удовлетворительно описывается экспоненциальной функцией только в интервале заданных температур, определена область применения разрабатываемых значений частного коэффициента условий работы, которые будут распространяться на свай, изготовленные с применением принятого состава комплексной химической добавки, в интервале начальных температур грунтов от минус 0,5 до минус 6 °С.

3.3. Определение несущей способности фрагментов буровых свай

Для установления поверхности сдвига при нагружении буровой свай в искусственно засоленном многолетнемерзлом грунте, а также валидации теоретической зависимости степени засоленности грунта от времени и апробации усовершенствованной методики определения несущей способности буровых свай в искусственно засоленных грунтах проведены лотковые испытания фрагментов свай статическими осевыми ступенчато возрастающими нагрузками.

Сопротивление мерзлых грунтов основания фрагментов буровых свай сдвигу определено при двух температурах песка: минус 0,6 и минус 2,7 °С по результатам статических испытаний. Результаты статических испытаний представлены в виде графиков зависимости перемещения от нагрузки и перемещения во времени (см. Рисунки 3.13–3.16).

Испытания прекращены вследствие срыва фрагментов буронабивных свай по грунту. Перемещение первого фрагмента при температуре минус 0,6 °С составило 25,0 мм при нагрузке 70,7 кН, перемещение второго фрагмента при температуре минус 2,7 °С составило 24,7 мм при нагрузке 142,6 кН.

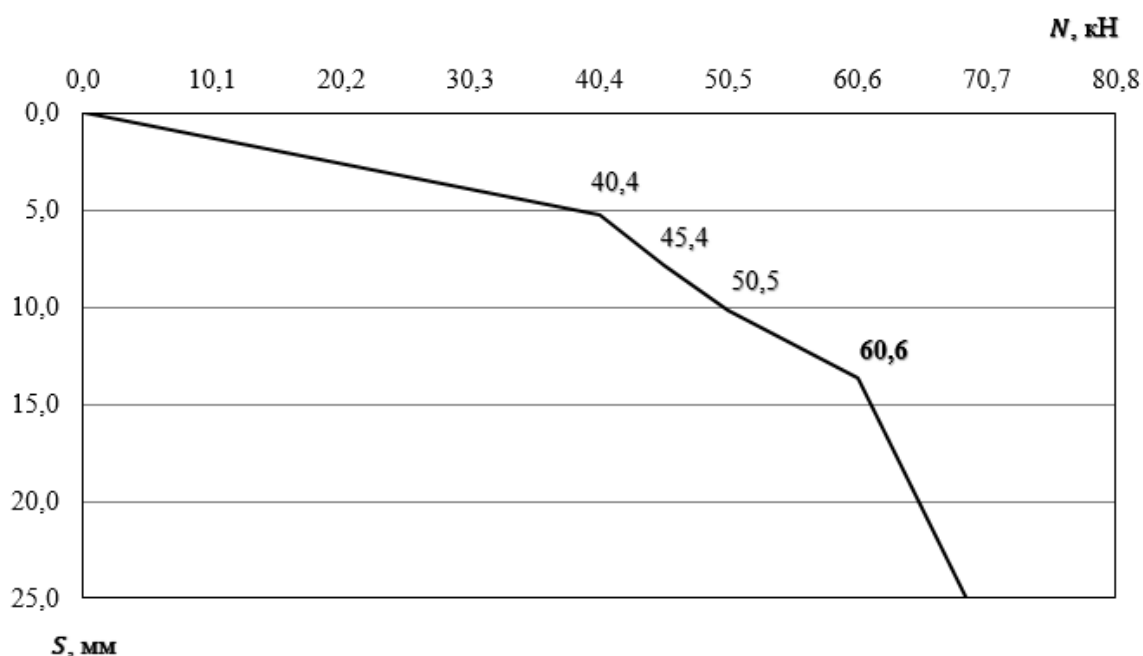


Рисунок 3.13 – Зависимость перемещения фрагмента сваи S , мм, от нагрузки N , кН, при температуре минус 0,6 °С

Несущая способность в соответствии со стандартным критерием срыва составила 60,6 и 124,7 кН. Однако при построении кривых ползучести скорость деформирования фрагментов увеличивается при нагрузках 35,3 и 90,9 кН по сравнению с предыдущими ступенями нагружения, поэтому эти величины приняты для расчета сопротивления грунта сдвигу.

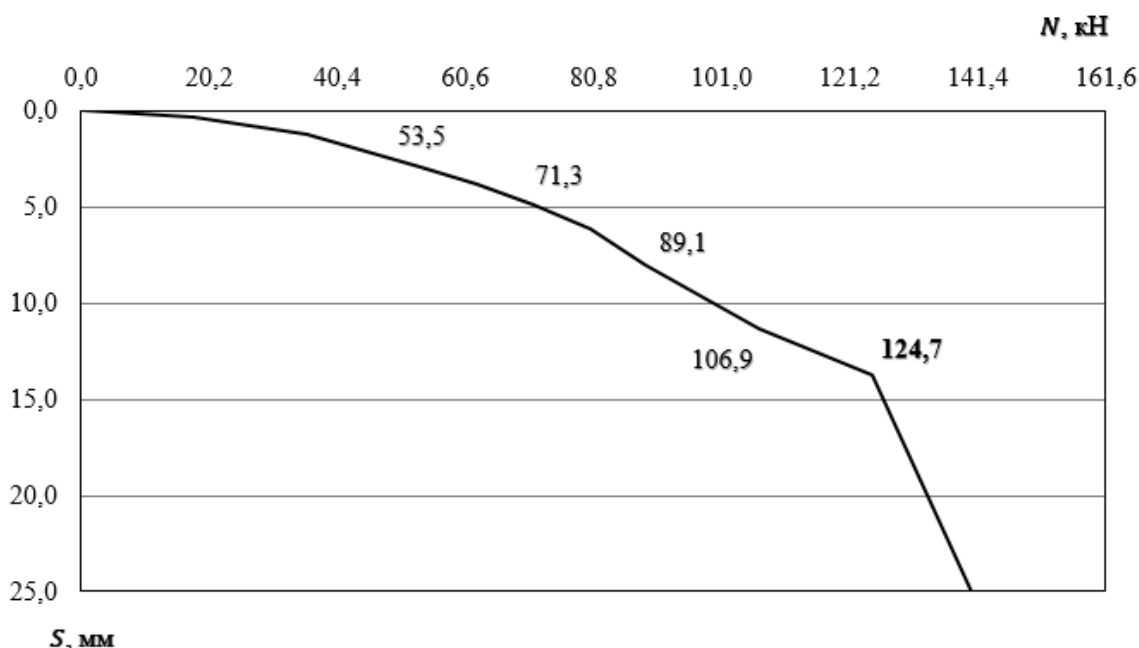


Рисунок 3.14 – Зависимость перемещения фрагмента свай S , мм, от нагрузки N , кН, при температуре минус 2,7 °С

С использованием формулы (2.1) и с учетом площади боковой поверхности фрагментов A_{sh} , равной 0,33 м², определен параметр расчетного сопротивления мерзлого песка сдвигу по поверхности смерзания с бетоном, затворенным с применением комплексной химической добавки R_{sh} . При температуре минус 0,6 °С сопротивление мерзлого песка сдвигу составило 107,0 кПа, при температуре минус 2,7 °С — 275,5 кПа.

Результаты статических испытаний фрагментов свай показали определенную сходимость с нормативными табличными данными [13] и результатами испытаний на одноплоскостной срез. При обеих температурах результаты лотковых испытаний оказались ниже нормативных значений не более чем на 20 %, и выше результатов испытаний на одноплоскостной срез на 50 %.

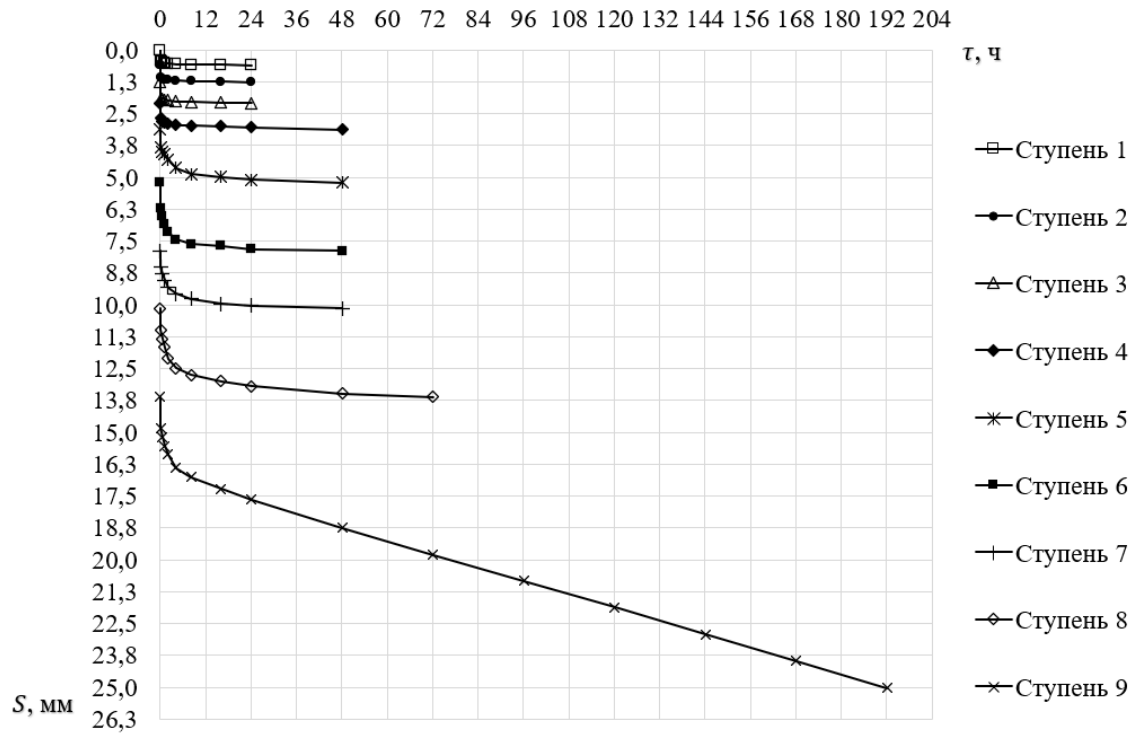


Рисунок 3.15 – Зависимость перемещения фрагмента сваи S , мм, от времени τ , ч, по ступеням нагружения при температуре минус $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$

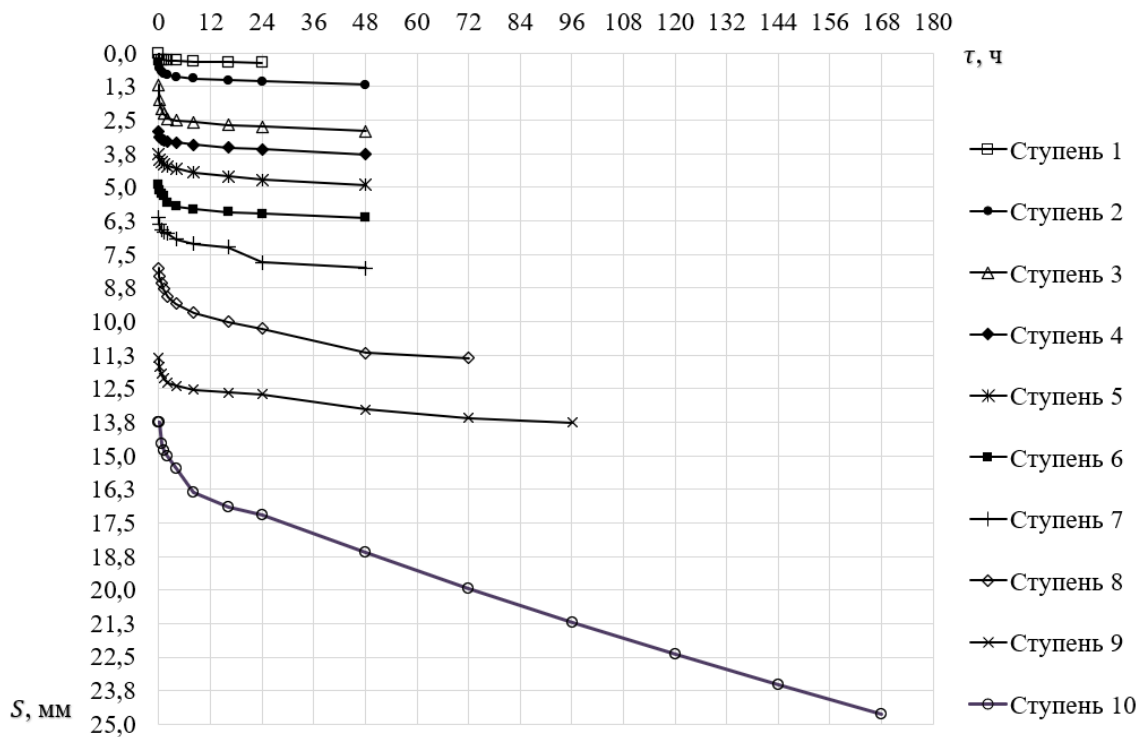


Рисунок 3.16 – Зависимость перемещения фрагмента сваи S , мм, от времени τ , ч, по ступеням нагружения при температуре минус $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$

Сопротивление сдвигу, полученное по результатам статических испытаний фрагментов, существенно (порядка 50 %) превышает сопротивление, полученное в результате испытаний на одноплоскостной срез. Выбранные размеры фрагментов буронабивной сваи (диаметр 350 мм) не должны сказываться на величине сил смерзания. Многими исследователями в их работах отмечается наличие такого влияния при диаметрах свай менее 150–200 мм, при больших диаметрах величина сил смерзания не зависит от габаритов [20].

По завершении статических испытаний лотки с фрагментами свай в мерзлом грунте разрезались с целью отбора образцов для определения влажности и степени засоленности грунта, а также с целью определения поверхности, по которой произошел сдвиг свай, и отбора образцов бетона для определения его прочности на сжатие (Рисунок 3.17).

По результатам визуального осмотра разрезанных лотков с фрагментами буронабивных свай установлено, что сдвиг в процессе нагружения происходит по поверхности грунт — грунт в непосредственной близости от свай. Вокруг свай образовался прослой мерзлого песка толщиной 20 мм с пониженной влажностью, что свидетельствует о наличии протекавших процессов фильтрации и миграции поровой влаги. Анализ результатов испытаний по определению влажности и степени засоленности грунта вокруг фрагмента свай приведен в главе 4.

Поверхность сдвига грунт — грунт является типичной для буронабивных свай, в том числе устраиваемых в талых (немерзлых) грунтах [49]. С точки зрения устройства буронабивных свай в многолетнемерзлых грунтах данное обстоятельство говорит о возможности проведения испытаний на одноплоскостной срез как по поверхности грунт — раствор, так и по поверхности грунт — грунт.

Для определения предельно длительного сопротивления сдвигу по поверхности грунт — раствор может использовать способ пробоподготовки, описанный в главе 2. Для поверхности грунт — грунт для образцов нарушенного сложения в ходе пробоподготовки следует устанавливать заданную степень засоленности, величину которой обосновывать путем проведения экспериментальных или расчетно-теоретических исследований.



Рисунок 3.17 – Результаты статических испытаний фрагментов буронабивных свай в мерзлом грунте

Из результатов анализа литературы и проведенных лабораторных испытаний следует, что в начальный момент времени грунт на контакте со свайей подвергается наибольшему засолению, а в дальнейшем с течением времени происходит выравнивание концентрации солей в бетоне и оттаявшем слое грунта до момента, пока бетон не начнет схватываться, а грунт не замерзнет. Поэтому чем больше время активного массообмена, который происходит конвективным путем при оттаивании грунта, тем меньшая степень засоленности грунта будет наблюдаться на контакте со свайей и тем больше будут его прочностные характеристики.

Кроме того, в процессе конвективного массообмена между раствором и грунтом при устройстве сваи направление движения поровой жидкости может меняться. Так, в рамках различных исследований ранее установлено, что движение жидкости при замерзании грунта может происходить в направлении фронта промерзания. Также это явление может быть связано с забором бетоном поровой жидкости из грунта при твердении. При этом сопротивление мерзлого грунта сдвигу имеет максимальное значение при полном водонасыщении грунта.

Поэтому для точного определения несущей способности путем применения коэффициентов условия работы буровых свай, изготовленных с использованием комплексной химической добавки, требуется определение степени засоленности грунтов основания, установившейся на момент их замерзания.

Выводы по главе 3

Результаты комплекса лабораторных исследований предельно длительного сопротивления сдвигу искусственно засоленных мерзлых грунтов позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Получены зависимости предельно длительного сопротивления сдвигу искусственно засоленных мерзлых глинистого и песчаного грунтов от температуры. Показано, что эффективность применения выбранной комплексной химической добавки выше в глинистых грунтах. Это объясняется тем, что при засолении параметр более существенно снижается у песчаных грунтов. В целом снижение величины сопротивления сдвигу при засолении может превышать 50 %.

2. Установлено, что зависимость предельно длительного сопротивления сдвигу от степени засоленности грунтов может быть удовлетворительно аппроксимирована логарифмическими или экспоненциальными функциями, что подтверждается данными, приведенными в [13, 20]. Коэффициент детерминации превышает 0,9. С учетом этого, на основе описанных выше результатов лабораторных испытаний рассчитаны поправочные коэффициенты, с использованием которых получены экспоненциальные зависимости сопротивления сдвигу от степени засоленности и температуры глинистого и песчаного грунтов для принятого состава бетона с комплексной химической добавкой (ФН + ПФМ-НЛК).

3. Определено, что при гидроизоляции грунта защитным материалом на основе жидкой резины предельно длительное сопротивление сдвигу увеличивается в 1,2–1,3 раза по сравнению с искусственно засоленными образцами. Эффективность предложенного решения достигается при заливке раствора на образец сразу после нанесения гидроизолирующего материала.

4. Определена область применения разрабатываемых значений частного коэффициента условий работы, распространяющихся на сваи, изготовленные с применением принятого состава бетона с комплексной химической добавкой, в интервале начальных температур грунтов от минус 0,5 до минус 6 °С.

5. Для апробации разрабатываемой методики по результатам статических испытаний фрагментов свай в мерзлом грунте получены величины их несущей способности по боковой поверхности при начальных температурах вмещающих грунтов минус 1 °С и минус 3 °С. Сравнение предельно длительного сопротивления сдвигу искусственно засоленных грунтов основания фрагментов показало, что полученные значения выше результатов испытаний на одноплоскостной срез на 50 %. Это может объясняться продолжительностью протекания массообменных процессов и, как следствие, увеличением прочности грунта во времени при выравнивании степени засоленности основания вокруг свай, что показано ранее проведенными исследованиями [77].

6. Установлено, что сдвиг в процессе нагружения происходит по поверхности грунт — грунт в непосредственной близости от свай, что коррелируется с общепринятыми представлениями, в том числе для буронабивных свай в талых (немерзлых) грунтах [49]. Для буровых свай, изготовленных с применением химических добавок, помимо прочего, поверхность обуславливается наиболее высокой степенью засоленности грунтов на контакте со сваей. Таким образом, развиты представления о закономерностях изменения прочностных свойств искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтов основания свай.

ГЛАВА 4. ТЕПЛОМАСООБМЕН МЕЖДУ МАТЕРИАЛОМ СВАИ И МЕРЗЛЫМ ГРУНТОМ

Одним из наиболее важных параметров, влияющих на сопротивление многолетнемерзлого грунта сдвигу, является его температура. Она определяет прочность льдоцементных связей, а при устройстве буровых свай в мерзлых грунтах от температуры зависит время замерзания грунта.

Тепловыделение буронабивных свай в талых (немерзлых) грунтах исследовалось Дзаговым А.М. [55]. Им установлено, что в первые сутки после устройства сваи происходит активное тепловыделение, температура бетона резко возрастает, а затем падает и достигает температуры основания через 14–28 суток после устройства. На Рисунке 4.1 представлена зависимость температуры бетона буронабивной сваи диаметром 600 мм от времени.

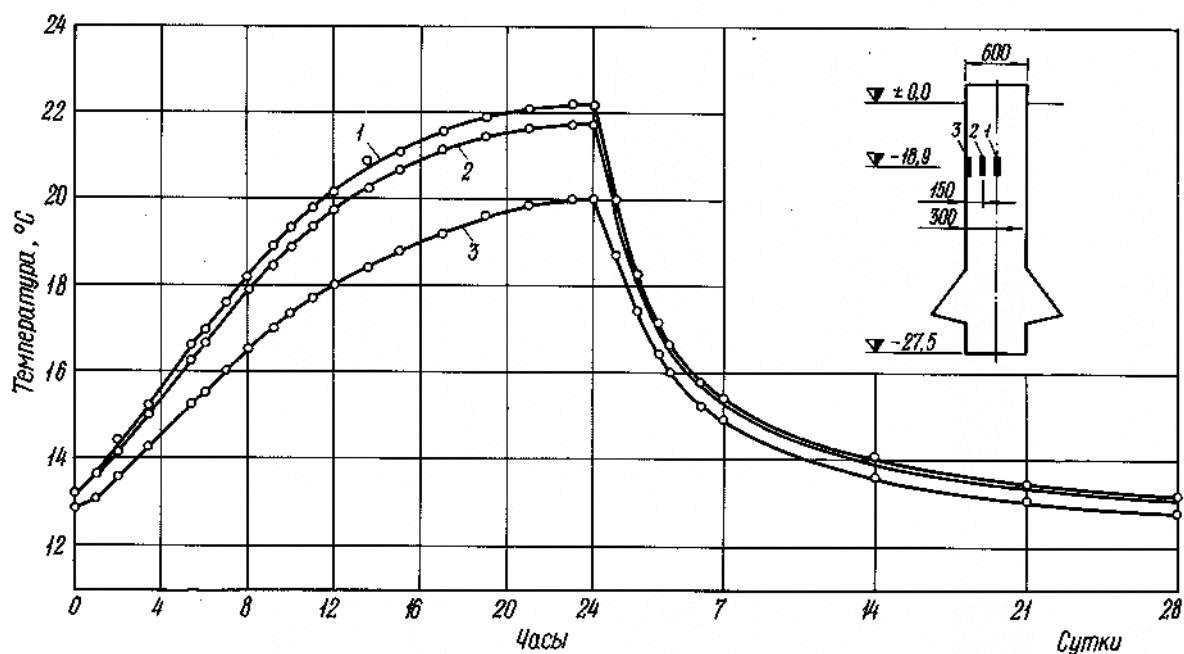


Рисунок 4.1 – Зависимость температуры бетона сваи от времени [55]

Температура грунтов составляла порядка плюс 13 °C. При этом при отрицательной температуре основания, как показано далее, изменение во времени температуры бетона и грунта существенно отличается.

4.1. Определение температуры и степени засоленности грунтов

В процессе устройства и твердения бетона фрагментов буровых свай в лабораторных условиях для дальнейшей валидации результатов численного теплотехнического моделирования выполнялось измерение температуры. Установлено, что центр фрагмента сваи принимает отрицательную температуру за 5 часов после его устройства при начальной температуре минус 3 °С и только через 109 часов при начальной температуре минус 1 °С. Радиус оттаивания грунта вокруг сваи при температуре минус 3 °С составил около 50 мм, а при температуре минус 1 °С — более 150 мм.

В Таблице 4.1 представлены результаты замеров температуры многолетнемерзлых грунтов основания опытной площадки в городе Якутске в процессе набора прочности и замерзания бетона буровых свай.

Таблица 4.1 – Температура грунта основания опытной площадки

№ п/п	Дата замера	Температура грунтов основания (°С) на глубине (м)									
		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
1	28.07.20	+1,1	−1,5	−1,9	−2,1	−2,3	−2,4	−2,3	−2,3	−2,3	−2,3
2	24.08.20	+1,2	−1,1	−1,4	−1,6	−1,5	−1,6	−1,6	−1,8	−2,0	−2,2
3	25.08.20	+0,5	−1,1	−1,4	−1,6	−1,5	−1,5	−1,6	−1,8	−2,0	−2,2
4	11.09.20	+0,6	−0,9	−1,0	−1,2	−1,1	−1,2	−1,3	−1,6	−1,8	−2,0
5	15.09.20	+0,5	−0,9	−1,0	−1,1	−1,1	−1,2	−1,3	−1,6	−1,8	−2,0
6	21.09.20	+0,5	−0,9	−1,0	−1,1	−1,1	−1,3	−1,4	−1,6	−1,8	−2,0

Видно, что глубина сезонного оттаивания многолетнемерзлых грунтов не достигает 2 м. В пределах первых 6 м исследуемой глубины, обусловленной длиной свай, в течение двух месяцев, с июля по сентябрь, наблюдаются значительные колебания температуры до 1 °С.

Данная термометрическая трубка располагалась на расстоянии около 2 м до двух буронабивных свай. Отмеченные изменения в температуре грунтов площадки

могут быть связаны с устройством этих свай и внесением дополнительного тепла от бетона при его гидратации.

Результаты замеров температуры в теле бетона натуральных свай представлены на Рисунке 4.2.

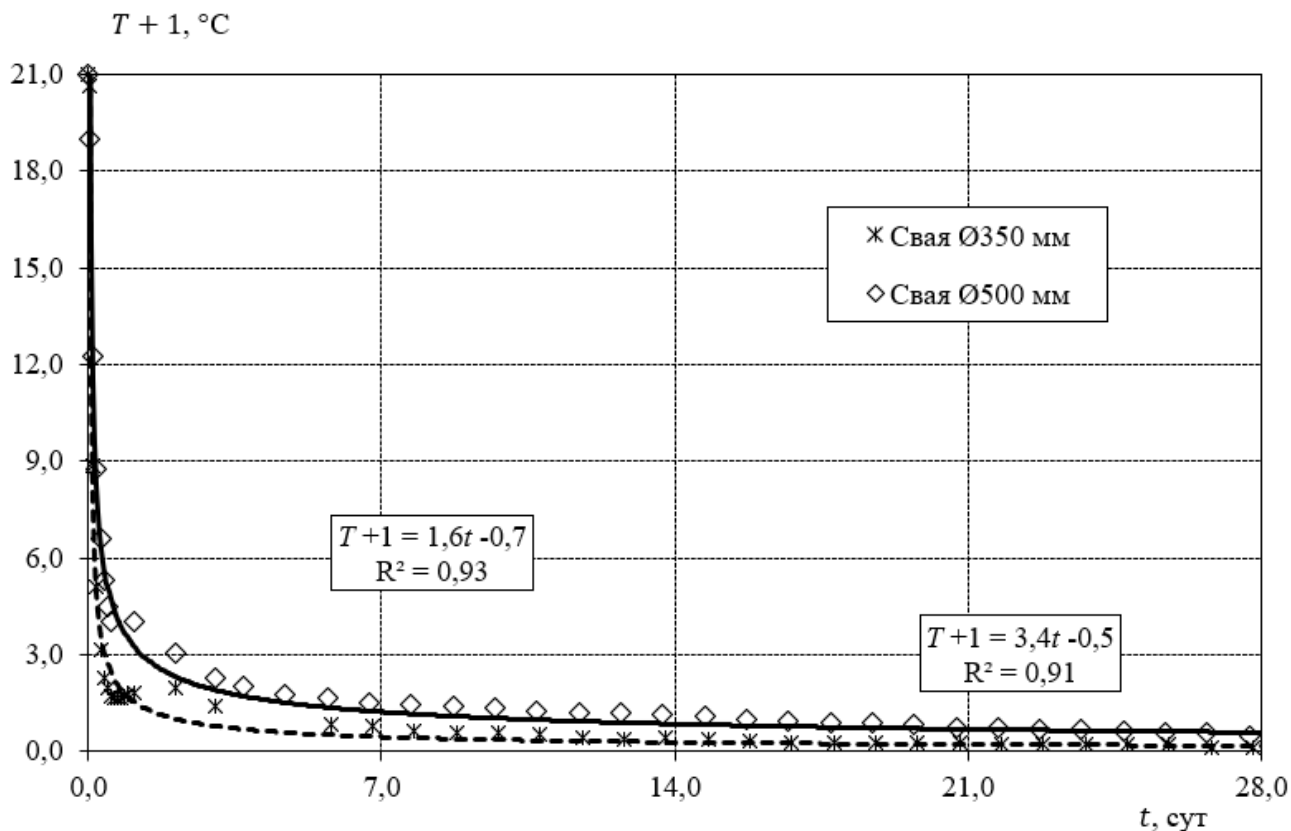


Рисунок 4.2 – Зависимость температуры бетона буронабивной сваи $T, ^\circ\text{C}$, от времени $t, \text{сут.}$ после устройства

Температура в центре сваи диаметром 350 мм опускается до минус $0,1 ^\circ\text{C}$ по истечении 144–192 часов после устройства, в центре сваи диаметром 500 мм — 408–432 часа.

Процесс дополнительного тепловыделения бетона при гидратации в условиях отрицательных температур окружающего грунта выражен достаточно четко и виден на зависимостях для обеих свай, однако количественно тепловыделение не существенно. Для сваи диаметром 350 мм рост температуры наблюдается в пределах $0,3 ^\circ\text{C}$, для сваи диаметром 500 мм — в пределах $0,1 ^\circ\text{C}$.

Дальнейшая интерпретация полученных данных возможна путем проведения численных теплотехнических расчетов взаимодействия буровых свай с многолетнемерзлым грунтом и сопоставления результатов расчетов с опытными лабораторными и полевыми данными.

Для определения зависимости степени засоленности мерзлого грунта от времени и расстояния до сваи после окончания статических испытаний фрагментов буровых свай отбирались образцы грунта. Всего отобрано 12 образцов на различном удалении от фрагмента сваи: на контакте, на расстоянии 50 и 100 мм.

Начальная концентрация порового раствора бетонной смеси $C_{ps,c,0}$ составляла 0,07 д. ед. Концентрация солей в водных вытяжках ω , %, определялась в зависимости от электрической проводимости X , мСм/см:

$$\omega = 0,00006 \cdot \left(\frac{1}{X}\right)^{-1,106}. \quad (4.1)$$

Через концентрацию ω рассчитывалась масса солей в вытяжках g_s , г, и далее определялась степень засоленности грунта D_{sal} , %:

$$D_{sal} = (g_s/g_d)100, \quad (4.2)$$

где g_d — масса сухой навески грунта (включая массу солей), г.

Концентрация порового раствора грунтов C_{ps} , д. ед., определялась в зависимости от влажности образцов W , д. ед., по формуле:

$$C_{ps} = D_{sal}/(D_{sal} + 100W). \quad (4.3)$$

Результаты испытаний представлены в виде графиков на Рисунках 4.3–4.5.

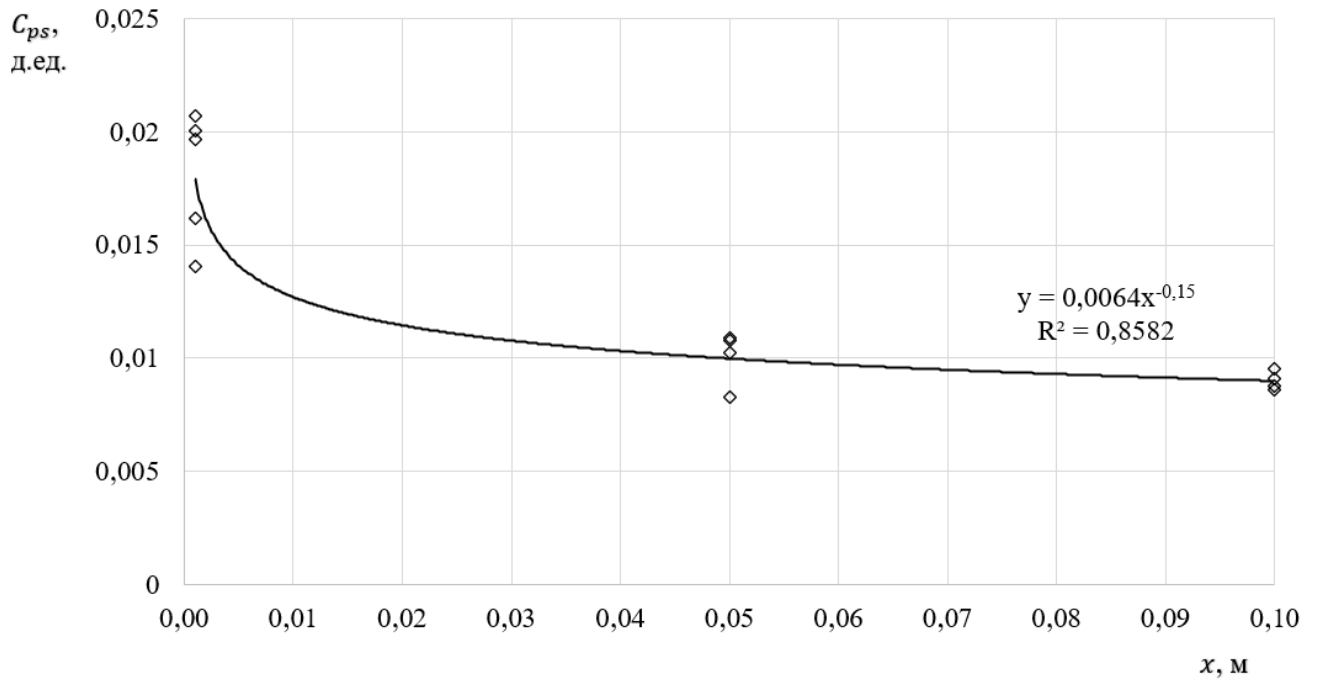


Рисунок 4.3 – Зависимость концентрации порового раствора грунта C_{ps} , д. ед., от расстояния до фрагмента сваи x , м

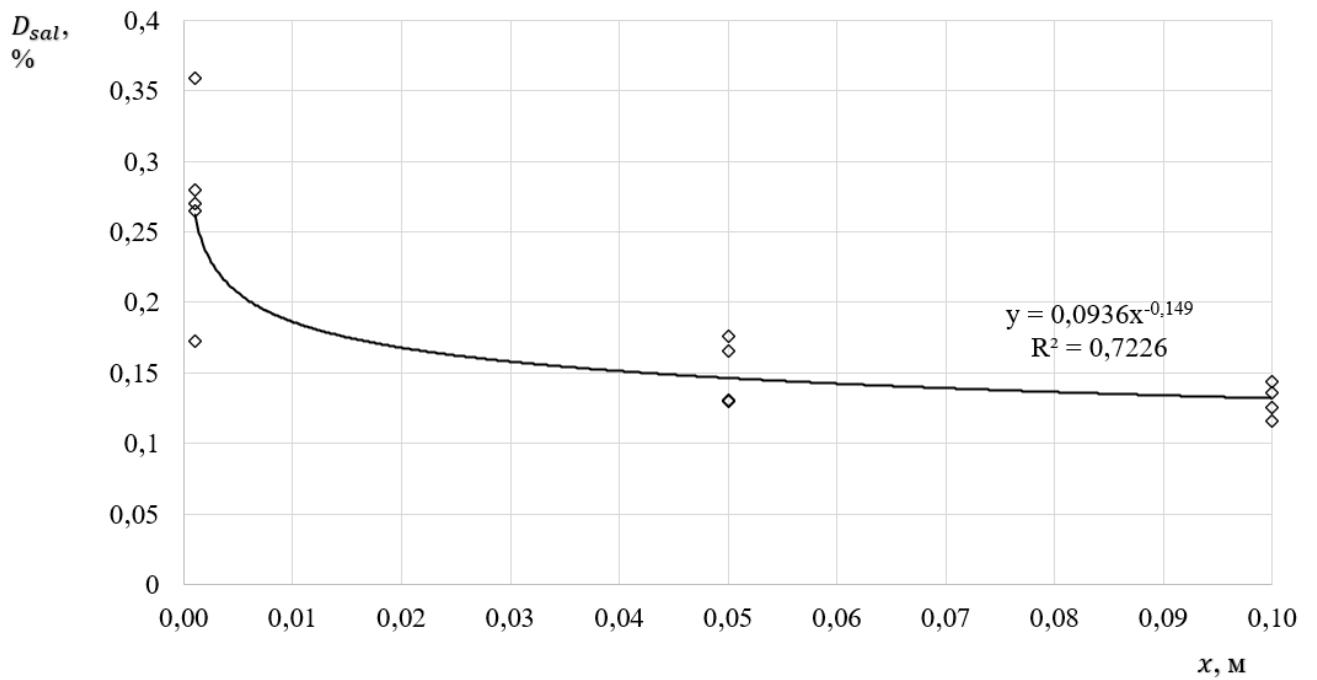


Рисунок 4.4 – Зависимость степени засоленности грунта D_{sal} , %, от расстояния до фрагмента сваи x , м

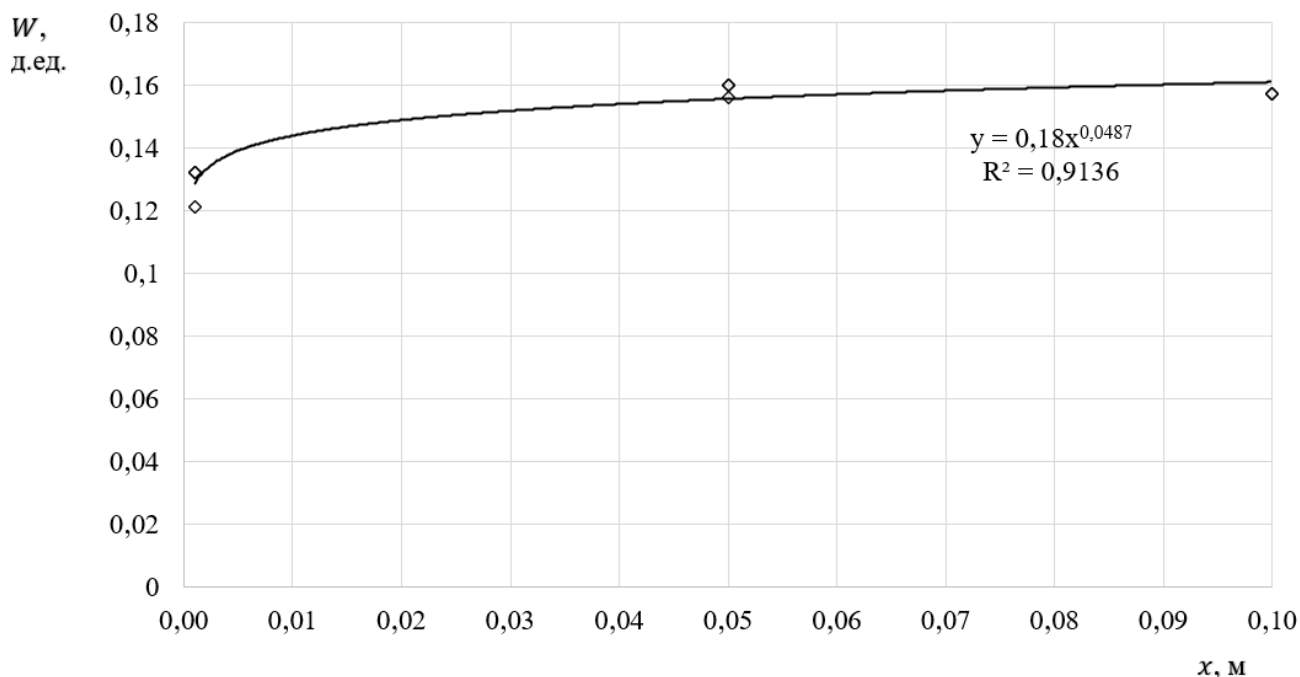


Рисунок 4.5 – Зависимость влажности грунта W , д. ед., от расстояния до фрагмента сваи x , м

Видно, что концентрация порового раствора и степень засоления грунта снижаются по мере удаления от фрагмента сваи, влажность по мере удаления от сваи напротив повышается. Таким образом, возникает контактный объем мерзлого грунта с измененными характеристиками. Солесодержание в контактном к свае объеме грунта толщиной 50 мм вдвое выше, чем в остальном массиве вмещающего мерзлого грунта; влажность на 17 % ниже.

Прочностные характеристики засоленных грунтов ниже, чем у незасоленных. С учетом зависимости сопротивления мерзлых грунтов сдвигу от степени их засоленности можем построить график зависимости сопротивления от расстояния до фрагмента сваи (Рисунок 4.6). Наименьшие показатели сопротивления сдвигу должны наблюдаться на контактной поверхности сваи с грунтом, что также косвенно подтверждается результатами вскрытия лотков.

На основе полученных графиков зависимостей концентрации порового раствора, степени засоленности и сопротивления сдвигу околоосвайное пространство грунта основания можно разделить на условные зоны.

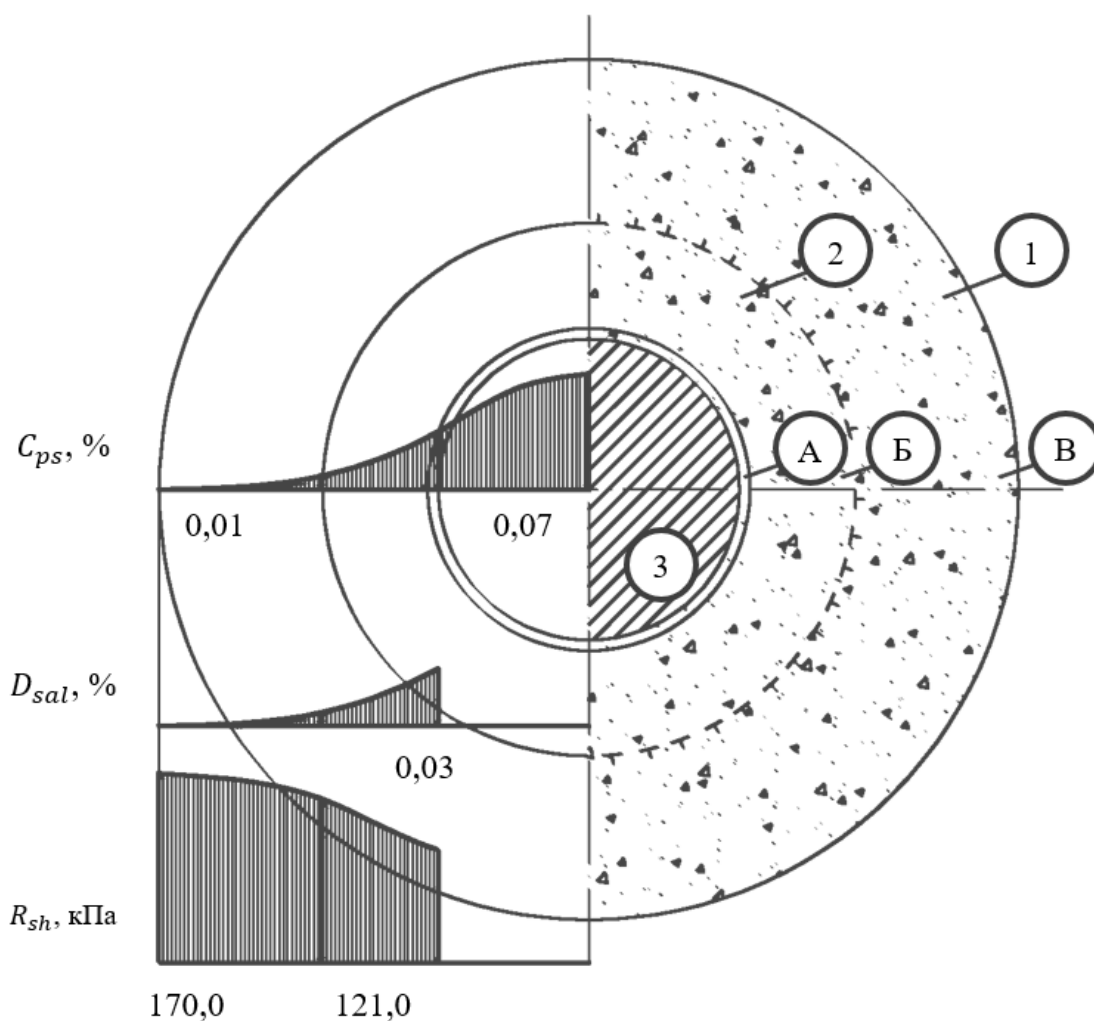


Рисунок 4.6 – Зависимость концентрации порового раствора C_{ps} , д. ед., степени засоленности D_{sal} , %, и сопротивления сдвигу R_{sh} , кПа, от расстояния до центра буровой сваи: 1 — многолетнемерзлый грунт, не оттаивающий в процессе устройства сваи; 2 — грунт, оттаивающий в процессе устройства сваи; 3 — буровая свая

Зона «А» соответствует максимальному значению концентрации степени засоленности грунта и минимальному значению сопротивления грунта сдвигу. Радиус зоны на 1–2 см превышает радиус сваи. В данной зоне при длительном воздействии предельной нагрузки происходит сдвиг сваи.

Зона «Б» соответствует области грунта, оттаивающей в процессе устройства сваи и подвергающейся активному массообмену с бетоном, однако в этой зоне наблюдается резкое снижение концентрации порового раствора и степени засоленности грунта, при этом увеличение его сопротивления сдвигу.

Зона «В» соответствует области грунта основания свай, не оттаивающей в процессе устройства свай и в которой не происходит или происходит незначительное повышение концентрации порового раствора и степени засоленности грунта. Сопротивление грунта сдвигу в этой зоне не претерпевает значительных изменений, то есть грунт находится в естественном состоянии.

Следует отметить, что рассматриваемое зонирование околосвайного пространства справедливо лишь для определенного момента времени после замерзания грунта и прекращения конвективной части массообмена между ними. Значения этих параметров будут изменяться и далее в сторону выравнивания (в связи с диффузионной составляющей массообмена), однако с меньшей скоростью. Поэтому момент времени после замерзания принят в качестве расчетного, то есть худшего с точки зрения величины сопротивления сдвигу.

4.2. Численное моделирование теплового взаимодействия буровых свай различных диаметров с многолетнемерзлым грунтом

Численное теплотехническое моделирование теплового взаимодействия буровых свай с многолетнемерзлым грунтом выполнено с целью разработки методики предварительной оценки времени замерзания оснований, оттаявших в процессе устройства свай в программном комплексе Борея 3D [61]. Всего проведено 30 расчетов для пяти диаметров свай 350; 500; 650; 800 и 950 мм, пяти температур — минус 0,5; минус 1; минус 2; минус 4 и минус 6 °С, а также различных теплофизических свойств грунтов.

В качестве расчетной области принят трехмерный грунтовый массив глубиной 70 м, с размерами в плане 20,0×20,0 м. Шаг сетки принят адаптивным от 0,01×0,01×0,1 до 1,0×1,0×0,5 м. Общий вид теплотехнической модели представлен на Рисунке 4.7.

Прогнозные расчеты выполнялись на период 28 дней. Интервал выдачи результатов — 1 сутки. Параметры климатических условий, а также граничные условия приняты постоянными на весь период расчета [61].

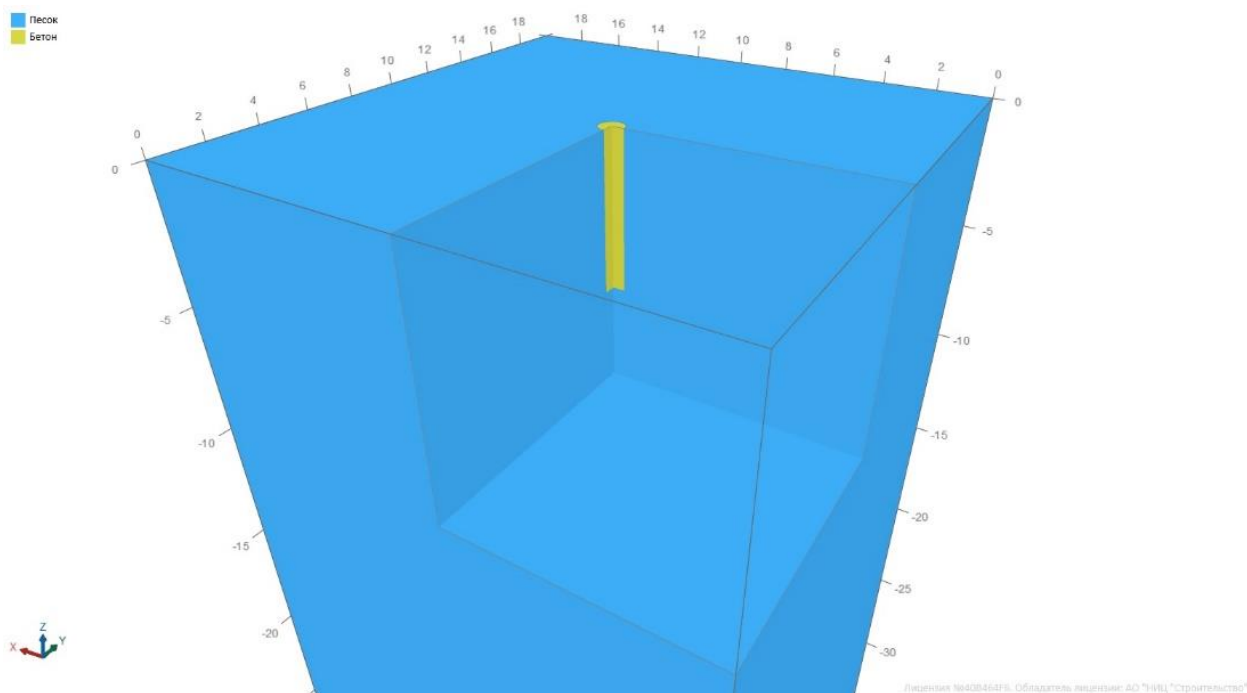


Рисунок 4.7 – Общий вид теплотехнической модели

На верхней поверхности модели принято граничное условие третьего рода с соответствующими климатическими параметрами. Среднемесячные значения температуры приземного воздуха приняты по метеорологическим станциям, расположенным в Салехарде, Якутске, Норильске и Тамбее в соответствии с [17].

Среднемесячные значения температуры приземного воздуха приведены в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Среднемесячные значения температуры приземного воздуха

Метеостанция	Температура приземного воздуха, °С											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Салехард	–24,1	–23,1	–15,1	–8,6	–0,8	9,2	14,6	11,2	5,4	–3,8	–14,9	–20,3
Якутск	–38,5	–34,0	–19,8	–4,2	8,1	16,6	19,7	15,6	6,5	–7,2	–27,2	–37,2
Норильск	–27,5	–26,7	–20,9	–13,5	–4,5	6,9	14,3	11,2	4,0	–8,5	–21,2	–24,7
Тамбей	–25,7	–25,1	–22,4	–15,9	–6,9	0,9	5,5	6,7	3,1	–6,8	–15,7	–21,9

Среднемесячные значения скорости ветра и высоты снежного покрова приняты постоянными с начального момента моделирования в соответствии с архивными данными и приведены в Таблицах 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3 – Среднемесячные значения скорости ветра

Метеостанция	Скорость ветра, м/с											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Салехард	2,6	2,6	2,9	3,4	3,6	3,7	3,4	2,9	2,8	3,1	2,6	2,6
Якутск	0,8	0,9	1,4	2,2	2,6	2,4	2,2	2,1	2,1	1,8	1,2	0,9
Норильск	5,2	4,6	4,9	4,7	4,7	4,7	4,4	4,5	4,6	4,7	4,6	5,1
Тамбей	6,1	6	5,9	6	6,2	5,6	5,3	5,7	5,8	6,5	6,5	6,4

Таблица 4.4 – Среднемесячные значения высоты снежного покрова

Метеостанция	Высота снежного покрова, м											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Салехард	0,20	0,23	0,25	0,23	0,10	0,01	—	—	—	0,03	0,10	0,16
Якутск	0,13	0,14	0,15	0,08	—	—	—	—	—	0,02	0,07	0,11
Норильск	0,35	0,37	0,37	0,37	0,36	0,17	—	—	—	0,02	0,16	0,28
Тамбей	0,24	0,27	0,33	0,39	0,24	—	—	—	—	0,08	0,13	0,20

Значения необходимых в качестве исходных данных физических и теплофизических характеристик грунта и бетона приведены в Таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Физические и теплофизические характеристики грунта и бетона

Материал	$W_{tot}, \%$	$\rho_d, \text{кг/м}^3$	$T_{bf}, \text{°C}$	$\lambda_{th}, \text{Вт/(м°C)}$	$\lambda_f, \text{Вт/(м°C)}$	$C_{th}, \text{МДж/(м}^3\text{°C)}$	$C_f, \text{МДж/(м}^3\text{°C)}$
Грунт	0,20	1850	−0,10	2,41	2,78	2,94	2,11
Бетон	—	—	−0,05	1,50	1,50	2,00	1,90

Перед началом моделирования выполнялась калибровка модели по коэффициенту теплообмена для граничного условия на поверхности модели. Граничное условие подбиралось таким образом, чтобы обеспечить требуемую среднюю по глубине температуру грунта. Соответственно, климату Салехарда соответствовала средняя по глубине температура грунта минус 0,5 °С, Якутска — минус 1 °С, Норильска — минус 2 °С, Тамбея — минус 4 и минус 6 °С.

Принятые граничные условия на поверхности и боковых гранях моделей приведены в Таблице 4.6.

Граничное условие	Параметр	Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Климат Салехард	Температура, °С	-24,1	-23,1	-15,1	-8,6	-0,8	9,2	14,6	11,2	5,4	-3,8	-14,9	-20,3
	Коэффициент теплообмена, Вт/м²·К	0,9	0,8	0,7	0,8	1,6	8,7	10,5	9,3	9,1	3,9	1,6	1,1
Климат Якутск	Температура, °С	-38,5	-34,0	-19,8	-4,2	8,1	16,6	19,7	15,6	6,5	-7,2	-27,2	-37,2
	Коэффициент теплообмена, Вт/м²·К	0,9	0,8	0,8	1,3	8,6	8,1	7,6	7,4	7,4	3,4	1,3	1,0
Климат Норильск	Температура, °С	-27,5	-26,7	-20,9	-13,5	-4,5	6,9	14,3	11,2	4,0	-8,5	-21,2	-24,7
	Коэффициент теплообмена, Вт/м²·К	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	17,4	17,8	18,2	5,7	1,0	0,6
Климат Тамбей (минус 4 °С)	Температура, °С	-25,7	-25,1	-22,4	-15,9	-6,9	0,9	5,5	6,7	3,1	-6,8	-15,7	-21,9
	Коэффициент теплообмена, Вт/м²·К	1,2	1,1	0,9	0,7	1,2	21,9	20,8	22,3	22,6	3,2	2,1	1,4
Климат Тамбей (минус 6 °С)	Температура, °С	-25,7	-25,1	-22,4	-15,9	-6,9	0,9	5,5	6,7	3,1	-6,8	-15,7	-21,9
	Коэффициент теплообмена, Вт/м²·К	2,4	2,2	1,8	1,5	2,4	21,9	20,8	22,3	22,6	6,0	4,0	2,9
Боковые и нижняя грани	Тепловой поток, Вт/м²	0,0											

Также в расчетах учтено тепловое влияние от бетона при устройстве свай. Моделирование тепловыделения бетона при гидратации производилось внутренними источниками тепла. Условия теплообмена задавались граничным условием с суммарным тепловыделением для бетона В25. Зависимость суммарного тепловыделения бетона от времени по данным [108] приведена на Рисунке 4.8.

В результате расчетов получены значения времени, за которое происходит замерзание грунта вокруг свай различных диаметров после их устройства при различных начальных температурах многолетнемерзлых грунтов.

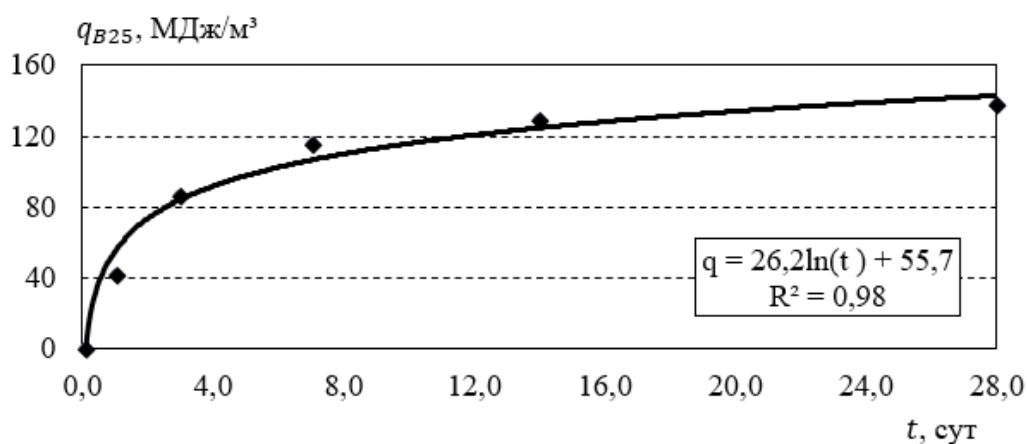


Рисунок 4.8 – Зависимость суммарного тепловыделения бетона буронабивной свай q_{B25} , МДж/м³, от времени t , сут по данным [108]

Температурные распределения в модели для различных диаметров свай представлены на Рисунках 4.9–4.13.

Зависимость времени замерзания грунтов t , сут, от температуры θ для диаметров свай 350; 500; 650; 800 и 950 мм приведена на Рисунке 4.14.

Выполнена валидация результатов теплотехнических расчетов по данным опытных работ по измерению температуры бетона буронабивных свай, изготовленных в многолетнемерзлом грунте. Результаты валидации представлены графически на Рисунке 4.15. Показано, что выполненные расчеты с точностью порядка 15 % позволяют определять температуру бетона свай в различные моменты времени после их устройства.

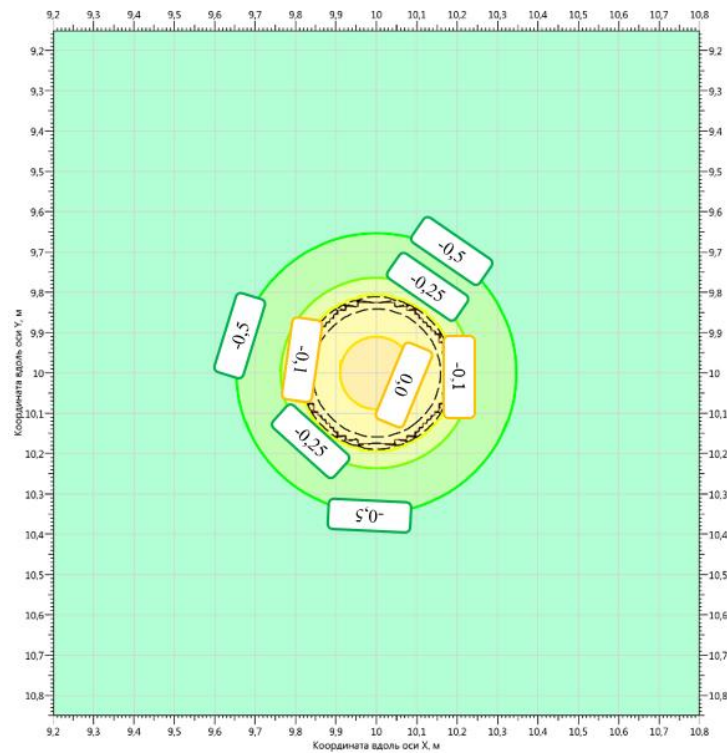


Рисунок 4.9 – Распределение температуры многолетнемерзлых грунтов в основании буронабивной сваи диаметром 350 мм

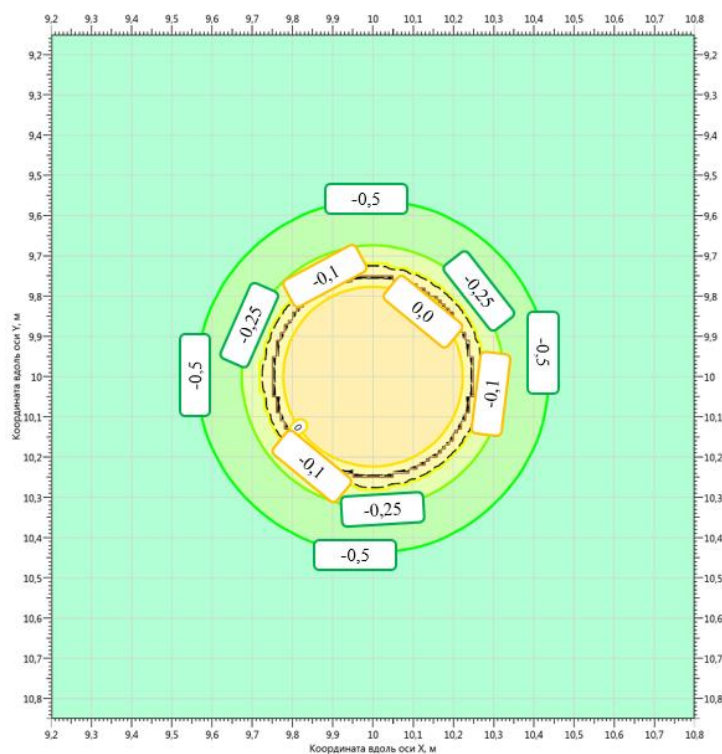


Рисунок 4.10 – Распределение температуры многолетнемерзлых грунтов в основании буронабивной сваи диаметром 500 мм

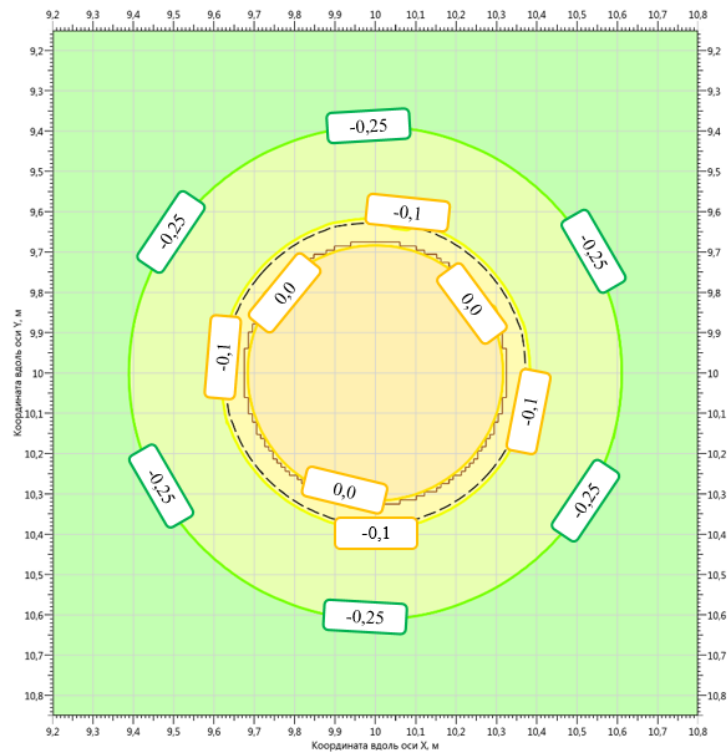


Рисунок 4.11 – Распределение температуры многолетнемерзлых грунтов в основании буронабивной сваи диаметром 650 мм

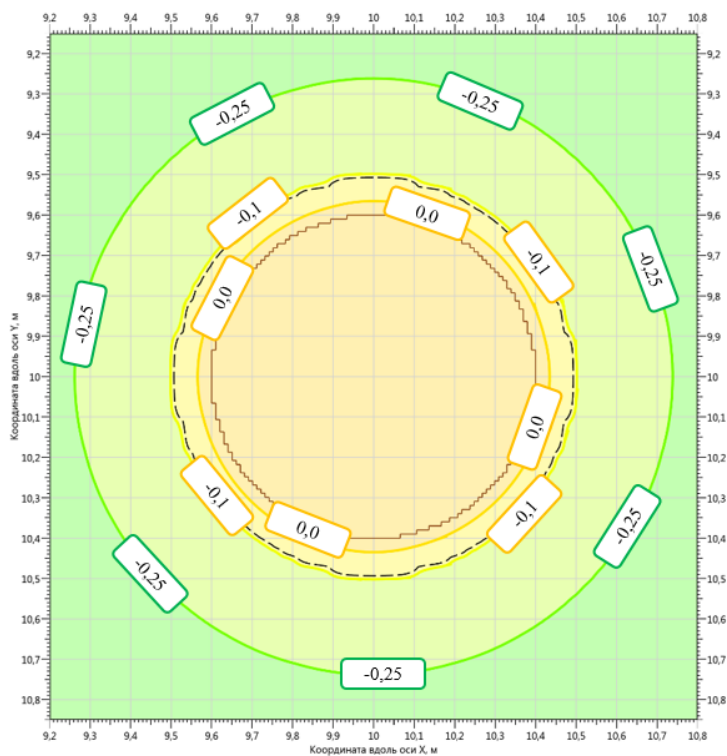


Рисунок 4.12 – Распределение температуры многолетнемерзлых грунтов в основании буронабивной сваи диаметром 800 мм

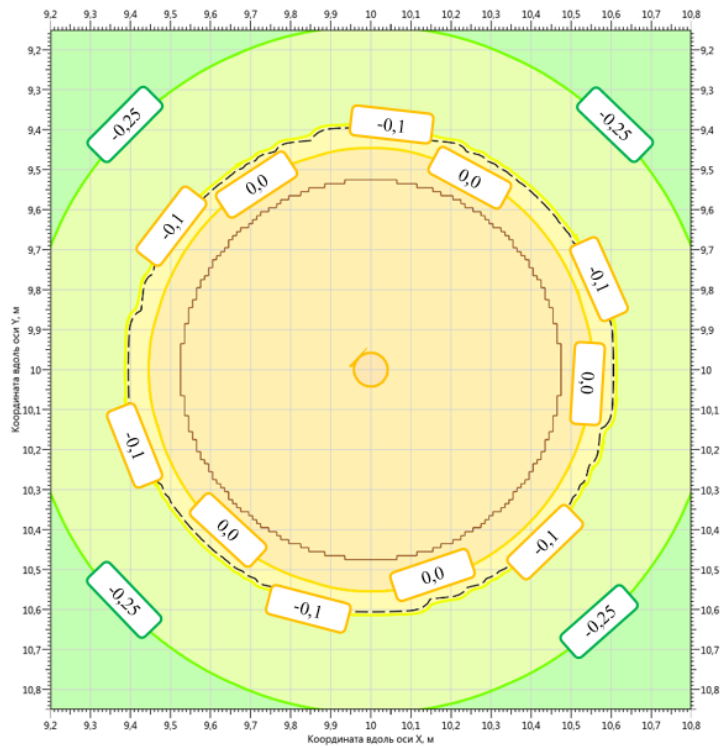


Рисунок 4.13 – Распределение температуры многолетнемерзлых грунтов в основании буронабивной сваи диаметром 950 мм

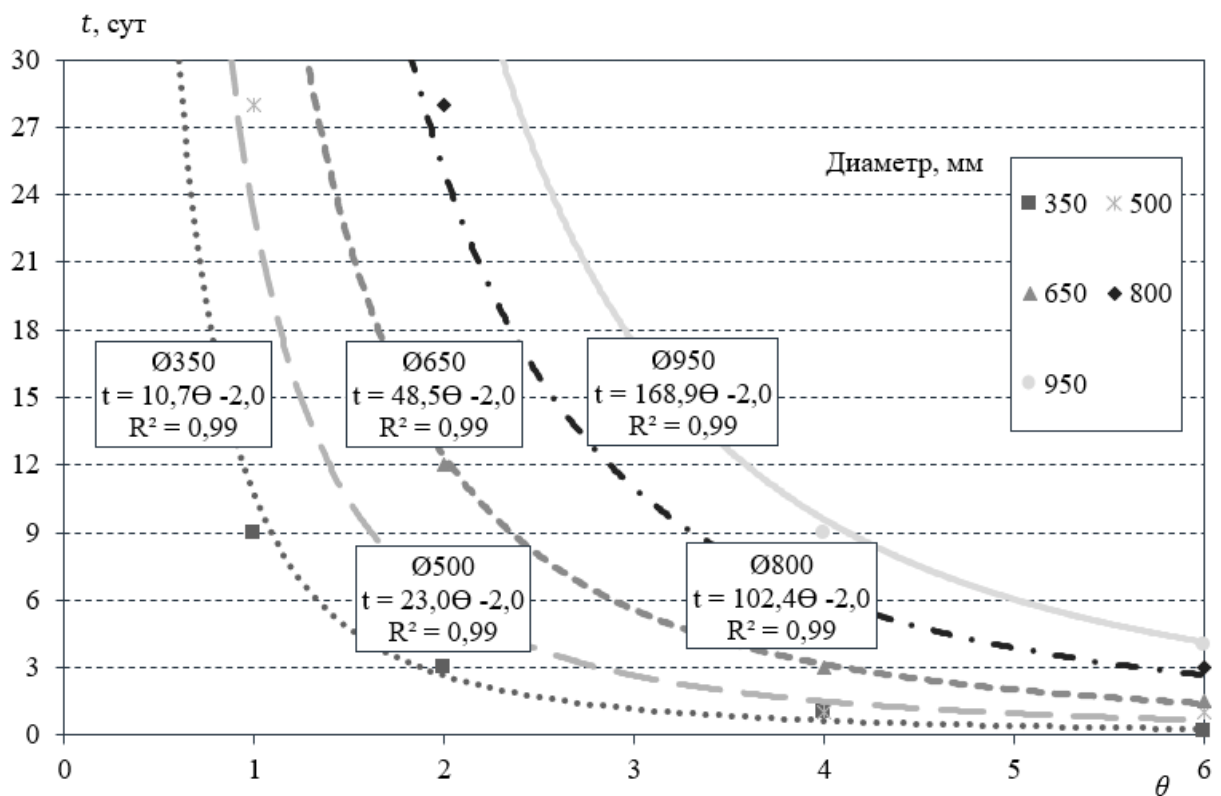


Рисунок 4.14 – Зависимость времени заморзания грунтов t , сут, от их безразмерной начальной температуры θ для различных диаметров свай d , мм

Далее с помощью регрессионного анализа получена зависимость времени замерзания грунта вокруг сваи t , сут, от следующих факторов:

X_1 — безразмерная начальная температура многолетнемерзлого грунта $\theta = T/T^*$;

T — начальная температура многолетнемерзлого грунта, °C;

T^* — температура, равная минус 1 °C;

X_2 — диаметр сваи d , м;

X_3 — отношение коэффициентов теплопроводности грунта в талом и мерзлом состояниях λ_{th}/λ_f .

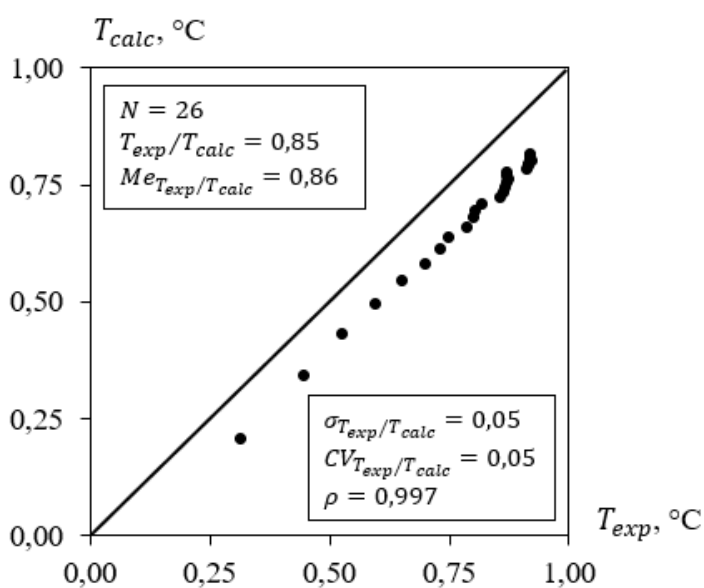


Рисунок 4.15 – Отношение опытного T_{exp} и расчетного T_{calc} значений температуры бетона сваи, °C

Для анализа принято уравнение множественной степенной регрессии следующего вида:

$$Y = AX_1^B \times X_2^C \times X_3^D, \quad (4.4)$$

где Y — время замерзания грунта вокруг сваи t , сут;

A , B , C и D — неизвестные коэффициенты.

Для применения метода наименьших квадратов и нахождения неизвестных коэффициентов степенная регрессия преобразована к линейному виду путем логарифмирования и замены переменных:

$$\ln Y = \ln A + B \ln X_1 + C \ln X_2 + D \ln X_3; \quad (4.5)$$

$$Y' = A' + BX'_1 + CX'_2 + DX'_3. \quad (4.6)$$

Значения факторов приведены в Таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Значения факторов регрессии

Y	X_1	X_2	X_3	Y'	X'_1	X'_2	X'_3
158,7	1,0	0,35	0,94	5,41	0,00	-1,05	-0,06
22,8	2,0	0,35	0,94	2,97	0,69	-1,05	-0,06
3,3	4,0	0,35	0,94	0,53	1,39	-1,05	-0,06
1,1	6,0	0,35	0,94	-0,90	1,79	-1,05	-0,06
4732,7	1,0	0,95	0,94	9,57	0,00	-0,05	-0,06
679,6	2,0	0,95	0,94	7,13	0,69	-0,05	-0,06
97,6	4,0	0,95	0,94	4,68	1,39	-0,05	-0,06
31,4	6,0	0,95	0,94	3,25	1,79	-0,05	-0,06
14,9	1,0	0,35	0,87	2,31	0,00	-1,05	-0,14
2,1	2,0	0,35	0,87	0,92	0,69	-1,05	-0,14
0,3	4,0	0,35	0,87	-0,46	1,39	-1,05	-0,14
0,1	6,0	0,35	0,87	-1,27	1,79	-1,05	-0,14
442,9	1,0	0,95	0,87	4,98	0,00	-0,05	-0,14
63,6	2,0	0,95	0,87	3,59	0,69	-0,05	-0,14
9,1	4,0	0,95	0,87	2,21	1,39	-0,05	-0,14
2,9	6,0	0,95	0,87	1,40	1,79	-0,05	-0,14

С помощью метода наименьших квадратов определено, что коэффициент $A = e^{A'} = 36669$, $B = -2,8$, $C = 3,4$, $D = 29,7$. Таким образом, степенная зависимость времени замерзания грунта вокруг сваи t , сут, от безразмерной начальной температуры θ , отношения коэффициентов теплопроводности грунта в талом и мерзлом состояниях λ_{th}/λ_f и диаметра сваи d , м, имеет вид:

$$t = \frac{36669 \cdot d^{3,4}}{\theta^{2,8}} (\lambda_{th}/\lambda_f)^{29,7}. \quad (4.7)$$

Далее выполнена проверка адекватности полученного уравнения.

Выполненная проверка адекватности уравнения показала статистическую значимость уравнения. Установлено, что не менее 95 % общей вариабельности функции $t(T_e, d, \lambda_{th}/\lambda_f)$ объясняется изменением X_1 , X_2 и X_3 .

В связи с тем, что уравнение получено по результатам численного моделирования одиночной сваи в однородной грунтовой среде, методику возможно использовать для предварительной оценки времени замерзания оснований, оттаявших в процессе устройства свай различных диаметров, от начальной температуры и теплофизических свойств многолетнемерзлых грунтов, при проектировании буронабивных свай, изготовленных из бетона класса прочности на одноосное сжатие B25.

4.3. Зависимость степени засоленности грунта вокруг свай от времени

Для расчета степени засоленности грунтов использовалась модель взаимодействия бетона буронабивной сваи с окружающим многолетнемерзлым грунтом, согласно которой массообмен происходит за счет диффузии, ограниченной временем замерзания грунта после устройства сваи [77]. Время замерзания определялось в соответствии с приведенной выше методикой (4.7). Наличием конвективной части массообмена пренебрегалось в запас надежности, так как с увеличением скорости процесса концентрация ионов в поровом растворе снижается гораздо быстрее.

Исходными данными для расчета по формуле (1.7) являлись коэффициенты осмотической диффузии k_d , м²/сут, и эффективной пористости грунта $n_{эф}$, д. ед. Физические свойства глинистого и песчаного грунтов приняты по Таблице 2.2.

Эффективная пористость грунта $n_{эф}$, д. ед., определялась по формуле:

$$n_{эф} = S_r \left(\frac{e}{1+e} \right). \quad (4.8)$$

Коэффициенты осмотической диффузии k_d , м²/сут, получены с учетом степени водонасыщения для формиата натрия с коэффициентом молекулярной диффузии в воде при температуре 20 °С, равным 1,3 м²/сут. Коэффициенты извилистости пор τ приняты равными 4,0 и 1,5 для глинистого и песчаного грунтов соответственно. Таким образом k_d глинистого грунта составил 0,001 м²/сут, песчаного — 0,01 м²/сут.

Результаты расчета представлены графически на Рисунке 4.16.

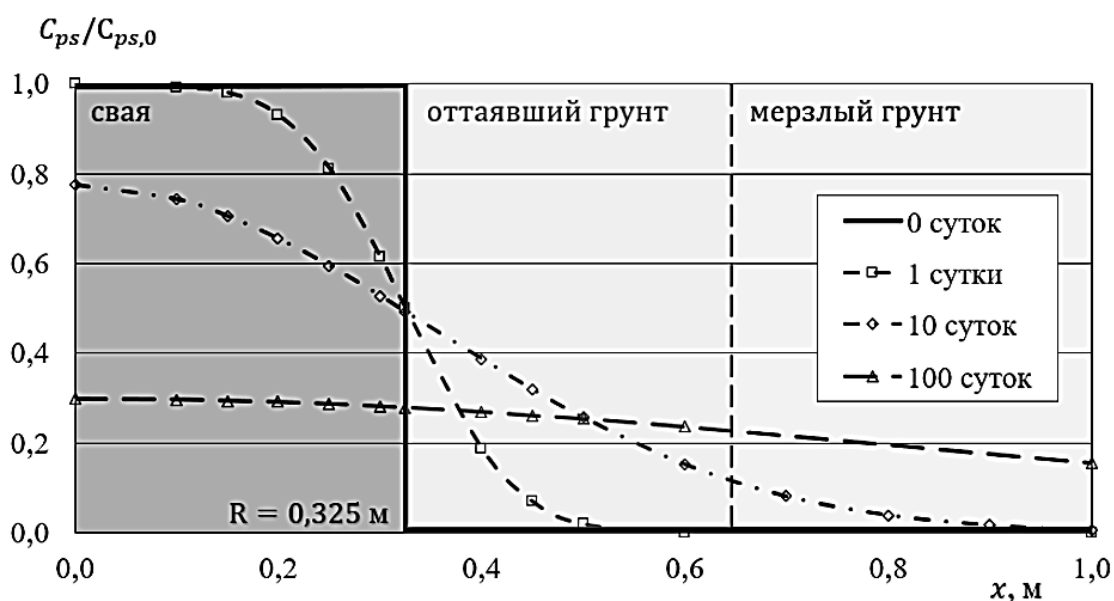


Рисунок 4.16 – Зависимость концентрации порового раствора грунта $C_{ps}/C_{ps,0}$ от расстояния x , м, до сваи на различные моменты времени после устройства

Видно, что согласно уравнению (1.6) в начальный момент времени концентрация порового раствора грунта падает значительно, до 50 % от начального значения. Далее продолжительное время данное значение сохраняется, а после начинает снижаться до равномерного значения по всей рассматриваемой области, в данном случае порядка 30 % от начального значения на границе раздела бетона и грунта. Результаты расчетов удовлетворительно соотносятся с опытными данными, полученными по результатам испытаний грунтов из лотков.

Полученные числовые значения приведены в Таблицах 4.8–4.9.

Таблица 4.8 – Концентрация порового раствора глинистых грунтов

Безразмерная начальная температура θ	Отношение λ_{th}/λ_f	Концентрация порового раствора C_{ps} , д. ед., при диаметре свай d , м				
		0,35	0,50	0,65	0,80	0,95
0,5	0,70	0,000				
	0,80	0,001	0,007	0,015	0,020	0,024
	0,90	0,024	0,029	0,031	0,032	0,033
1,0	0,70	0,000				
	0,80	0,000	0,000	0,001	0,005	0,009
	0,90	0,010	0,020	0,025	0,028	0,030
2,0	0,70	0,000				
	0,80					
	0,90	0,000	0,005	0,012	0,017	0,021
4,0	0,70	0,000				
	0,80					
	0,90	0,000	0,000	0,000	0,001	0,006
6,0	0,70	0,000				
	0,80					
	0,90					

Таблица 4.9 – Концентрация порового раствора песчаных грунтов

Безразмерная начальная температура θ	Отношение λ_{th}/λ_f	Концентрация порового раствора C_{ps} , д. ед., при диаметре свай d , м				
		0,35	0,50	0,65	0,80	0,95
0,5	0,70	0,004	0,013	0,020	0,024	0,027
	0,80	0,029	0,032	0,033	0,033	0,034
	0,90	0,029	0,025	0,022	0,020	0,018
1,0	0,70	0,000	0,001	0,004	0,010	0,015
	0,80	0,019	0,026	0,029	0,031	0,032
	0,90	0,032	0,033	0,033	0,033	0,032
2,0	0,70	0,000				
	0,80	0,004	0,014	0,020	0,024	0,027
	0,90	0,027	0,031	0,032	0,033	0,032
4,0	0,70	0,000				
	0,80	0,002	0,001	0,004	0,011	0,015
	0,90	0,016	0,024	0,028	0,030	0,031
6,0	0,70	0,000				
	0,80	0,001	0,001	0,001	0,002	0,006
	0,90	0,007	0,017	0,023	0,026	0,028

Результаты расчетов показали, что для небольших сроков замерзания оттаявших оснований, в пределах 1 суток, концентрация не успевает значительным образом вырасти и находится в пределах 2 %. При сроках более 1 суток концентрация повышается и устанавливается на продолжительный период в размере половины от заданного начального значения, что согласуется с результатами испытаний, выполненных в рамках данной работы, и данными, приведенными в [77].

Если знать величины концентрации порового раствора C_{ps} , д. ед., становится возможным определить степень засоленности грунтов D_{sal} , %, по формуле:

$$D_{sal} = 100WC_{ps}/(1 - C_{ps}). \quad (4.9)$$

Предельно длительное сопротивление сдвигу незасоленного и искусственно засоленного грунта основания буровой сваи возможно определить по полученным зависимостям (3.6) и (3.7). Таким образом, коэффициент условий работы буровой сваи $\gamma_{sh,sal}$ определяется как отношение значений сопротивления сдвигу искусственно засоленного к незасоленному грунту.

Коэффициент характеризует снижение расчетного сопротивления сдвигу многолетнемерзлого грунта вследствие искусственного засоления принятой комплексной химической добавкой.

Выводы по главе 4

Результаты комплекса экспериментальных и расчетно-теоретических исследований тепло- и массообмена между материалом буровой сваи и мерзлым грунтом ее основания позволяют сформулировать следующие выводы.

1. С использованием полученной нелинейной многофакторной зависимости разработана методика предварительной оценки времени замерзания оснований, оттаявших в процессе устройства свай различных диаметров, от начальной температуры и теплофизических свойств многолетнемерзлых грунтов, которую возможно использовать в этапе проработки конструктивных решений при проектировании фундаментов.

2. Выполнена валидация разработанной методики с использованием результатов замеров температуры грунтов основания фрагментов и натурных буронабивных свай. Показано, что расчеты с достоверностью порядка 15 % позволяют определять температуру бетона свай в различные моменты времени после их устройства. Методика применима для буровых свай, изготовленных из бетона класса по прочности на сжатие не ниже В25. Данный подход возможно использовать и для других конструкций и составов растворов свай с учетом соответствующих зависимостей их суммарного тепловыделения от времени.

3. Разработана схема для расчета несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах, включающая три зоны. Зона «А» соответствует максимальным значениям концентрации порового раствора и степени засоленности грунта и минимальному значению сопротивления грунта сдвигу. Зона «Б» соответствует области, оттаивающей в процессе устройства сваи и подвергающейся активному массообмену с бетоном. Радиус зоны примерно соответствует радиусу оттаивания грунта вокруг сваи. Зона «В» соответствует области грунта основания сваи, не оттаивающей в процессе устройства сваи и в которой не происходит повышение концентрации порового раствора и степени засоленности грунта. Расчет несущей способности рекомендуется выполнять по зоне «А».

4. Установлены зависимости концентрации порового раствора грунтов вокруг свай на различные моменты времени, рассчитанные с использованием методики предварительной оценки времени замерзания их оснований, оттаявших в процессе устройства.

Начальная концентрация порового раствора составляла 7 %. Результаты расчетов показали, что для небольших сроков замерзания оттаявших оснований, в пределах 1 суток, концентрация не успевает значительным образом вырасти и находится в пределах 2 %. При сроках более 1 суток концентрация повышается и устанавливается на продолжительный период в размере половины от заданного начального значения, что не противоречит уже имеющимся данным [77].

С использованием полученных результатов определены величины степени засоленности грунтов основания свай различных диаметров и значений времени замерзания оттаявших оснований, что позволило развить представления о механизме и закономерностях изменения степени засоленности многолетнемерзлых грунтов основания буровых свай.

ГЛАВА 5. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ БУРОВЫХ СВАЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК, В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОМ ГРУНТЕ

Несущей способностью одиночной буровой сваи в многолетнемерзлом грунте является предельно длительное сопротивление основания, ограниченное из условия развития в нем деформаций сдвига с заранее заданным условием [12]. Несущая способность определяется суммой предельных сопротивлений по боковой поверхности и под пятой сваи. В многолетнемерзлых грунтах предельное сопротивление по боковой поверхности сваи значительно превышает сопротивление под пятой и определяется значением сопротивления грунта сдвигу или сопротивлением сдвигу по поверхности смерзания с материалом сваи. Расчетное значение сопротивления сдвигу определяется с учетом коэффициентов надежности по грунту и условиям работы основания.

Коэффициент условий работы основания сваи учитывает отклонение действительных условий работы основания сваи от стандартных условий и служит для определения расчетных сопротивлений в условиях действительной работы. Изготовление буровых свай с химическими добавками в многолетнемерзлых грунтах, как отмечалось ранее, сопряжено с массопереносом солей из раствора в грунт, приводящим к засолению и снижению прочностных характеристик последнего [62, 105]. Коэффициент условий работы такой сваи в грунте должен учитывать степень снижения сопротивления сдвигу и зависеть от вида грунта, состава добавки, начальной температуры бетона и основания, габаритов сваи.

В начальный момент времени после устройства сваи степень засоленности грунта возрастает до максимальных значений, наблюдается снижение прочности. С течением времени, пока грунт на контакте со сваей находится в талом состоянии, концентрация в околосвайном пространстве снижается, имеет место возрастание сопротивления грунта сдвигу. В дальнейшем при замерзании грунта выравнивание концентрации солей в грунте продолжается, однако с гораздо меньшей скоростью, в основном за счет диффузии, как показано ранее [77].

5.1. Усовершенствованная методика расчета несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах

Учитывая полученные результаты исследования, несущую способность одиночной буровой сваи в искусственно засоленном многолетнемерзлом грунте, используемом по принципу I, следует определять по формуле:

$$F_u = \gamma_t \gamma_c (RA + \sum R_{sh,sal,i} A_{sh,i}), \quad (5.1)$$

где $R_{sh,sal,i}$ — расчетное предельно длительное сопротивление i -го слоя многолетнемерзлого искусственно засоленного грунта сдвигу, кПа, определяемое по результатам проведения испытаний грунта с заданной степенью засоленности, определенной по (1.7), или определяемое по формуле:

$$R_{sh,sal} = \frac{R_{sh,n,exp} \gamma_{sh,sal}}{\gamma_g}, \quad (5.2)$$

где $R_{sh,n,exp}$ — нормативное предельно длительное сопротивление сдвигу незасоленного многолетнемерзлого грунта, кПа, определяемое из испытаний;

γ_g — коэффициент надежности по грунту, определяемый по стандартизированной методике путем статистической обработки результатов лабораторных испытаний при доверительной вероятности α , равной 0,85;

$\gamma_{sh,sal}$ — коэффициент условий работы буровой сваи в искусственно засоленном многолетнемерзлом грунте, определяемый по формуле:

$$\gamma_{sh,sal} = \frac{R_{sh,sal,calc} \gamma_g}{R_{sh,n,exp}}, \quad (5.3)$$

где $R_{sh,sal,calc}$ — расчетное предельно длительное сопротивление сдвигу искусственно засоленного многолетнемерзлого грунта, кПа, определяемое по зависимости предельно длительного сопротивления от степени засоленности,

аналогичной (3.6) и (3.7). При этом степень засоленности определяется по (1.7) в зависимости от времени замерзания основания сваи, оттаявшего в процессе ее устройства. Расчет осуществляется по схеме на Рисунке 4.6.

Используя расчетное температурное распределение в многолетнемерзлых грунтах основания одиночной сваи, коэффициенты условий работы буровой сваи $\gamma_{sh,sal,i}$ следует определять для каждого расчетного i -го слоя грунта при своей средней температуре по аналогии с расчетным сопротивлением сдвигу.

Множество коэффициента условий работы буровых свай в искусственно засоленном многолетнемерзлом грунте получено для принятого состава комплексной химической добавки. Коэффициенты допустимо применять для буронабивных свай, изготовленных из бетона класса прочности на сжатие не ниже В25 при температурах основания от минус 0,5 до минус 6 °С.

Значения коэффициента для свай различных диаметров d , м, в глинистых и песчаных грунтах приведены в Таблице 5.1, в зависимости от начальной температуры основания T , °С, и отношения λ_{th}/λ_f .

Таблица 5.1 – Коэффициенты условий работы для буровых свай

$T, ^\circ\text{C}$	$\frac{\lambda_{th}}{\lambda_f}$	Коэффициент условий работы $\gamma_{sh,sal}$ при диаметре сваи d , м									
		Суглинки и глины					Пески и супеси				
		0,35	0,50	0,65	0,80	0,95	0,35	0,50	0,65	0,80	0,95
–0,5	0,70	1,00					0,90	0,71	0,58	0,52	0,48
	0,80	0,98	0,89	0,77	0,71	0,66	0,46	0,42	0,41	0,41	0,40
	0,90	0,66	0,60	0,58	0,57	0,56	0,46	0,51	0,55	0,58	0,62
–1,0	0,70	1,00					1,00	0,97	0,90	0,77	0,67
	0,80	1,00	1,00	0,98	0,92	0,86	0,60	0,49	0,46	0,43	0,42
	0,90	0,84	0,71	0,65	0,61	0,59	0,42	0,41	0,41	0,41	0,42
–2,0	0,70	1,00					1,00	1,00	1,00	1,00	0,97
	0,80	1,00					0,90	0,69	0,58	0,52	0,48
	0,90	1,00	0,92	0,81	0,75	0,69	0,48	0,43	0,42	0,41	0,42
–4,0	0,70	1,00					1,00				
	0,80	1,00					0,95	0,97	0,90	0,75	0,67
	0,90	1,00	1,00	1,00	0,98	0,90	0,65	0,52	0,47	0,44	0,43
–6,0	0,70	1,00					1,00				
	0,80	1,00					0,97	0,97	0,97	0,95	0,85
	0,90	1,00					0,83	0,63	0,54	0,49	0,47

Промежуточные значения коэффициента условий работы для соответствующего диаметра сваи, начальной температуры и отношения коэффициентов теплопроводности рекомендуется определять с помощью интерполяции.

5.2. Аprobация усовершенствованной методики

Для апробации усовершенствованной методики определения несущей способности проведены испытания четырех натуральных буровых свай статическими ступенчато возрастающими вдавливающими нагрузками [24] — два испытания свай диаметром 350 мм, длинами 5 и 6 м, и два испытания свай диаметром 500 мм, длинами 4 и 5 м. Для всех свай в рамках испытаний достигнут критерий срыва, соответствующий значению осадки, не менее чем в три раза превышающему значение осадки на предыдущей ступени, при общей осадке не менее 25 мм.

Результаты испытаний оформлены в виде графиков зависимости осадки свай S , мм, от нагрузки P , кН, и графиков зависимости осадки S , мм, от времени t , ч, и представлены на Рисунках 5.1–5.2.

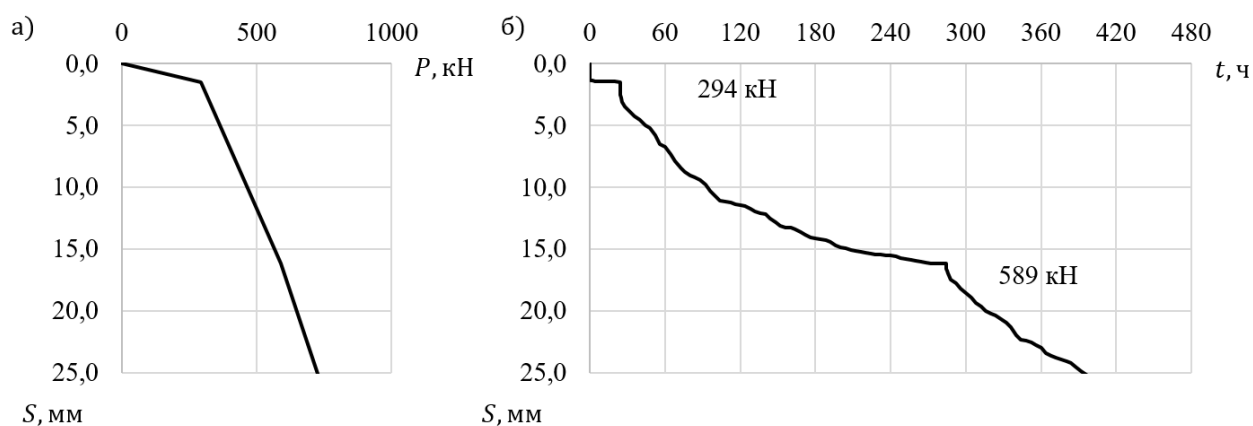


Рисунок 5.1 – Результаты испытаний свай Ø350 мм длиной 6 м: а) зависимость осадки свай S , мм, от нагрузки P , кН; б) зависимость осадки свай S , мм, от времени t , ч, по ступеням нагружения

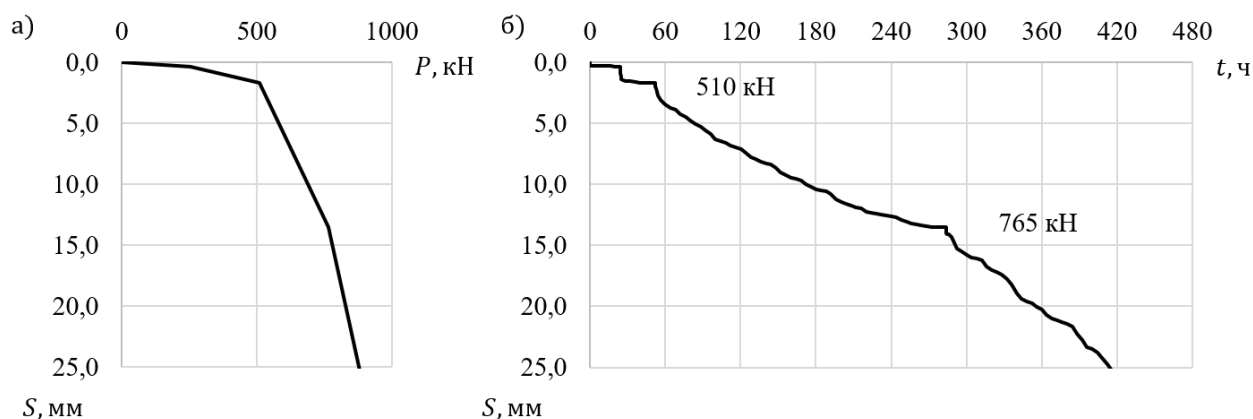


Рисунок 5.2 – Результаты испытаний свай $\varnothing 500$ мм длиной 5 м: а) зависимость осадки свай S , мм, от нагрузки P , кН; б) зависимость осадки свай S , мм, от времени t , ч, по ступеням нагружения

На Рисунках 5.1–5.2 видно, что при нагрузках, не превышающих предельно длительного сопротивления оснований свай, скорость деформирования сокращается со временем, имеет место затухающая ползучесть. При превышении предельно длительного сопротивления на очередной ступени нагружения скорость деформирования становится постоянной или возрастающей — установившаяся или прогрессирующая ползучесть, что характеризует срыв свай, как показано ранее Вяловым С.С. [46].

За предельно длительное сопротивление свай принималось значение, при котором процесс деформирования свай не переходит в стадию незатухающей ползучести. Так, для свай диаметром 350 мм, длинами 5 и 6 м несущая способность с учетом коэффициента надежности по грунту γ_g , принятого равным 1,1, составила 393 и 535 кН соответственно. Для свай диаметром 500 мм, длинами 4 и 5 м несущая способность составила 653 и 696 кН соответственно.

Для оценки несущей способности свай важно понимание о температурах многолетнемерзлых грунтов основания. Средняя температура грунтов по длине свай $\varnothing 350$ -5,0 в процессе испытания составила минус 0,7 °С, свай $\varnothing 350$ -6,0 — минус 0,9 °С, свай $\varnothing 500$ -4,0 — минус 1,2 °С, свай $\varnothing 500$ -5,0 — минус 0,8 °С, а температура многолетнемерзлых грунтов под пятой свай составила минус 1,1; минус 1,4; минус 1,0 и минус 1,1 °С соответственно.

В Таблицах 5.2 и 5.3 представлены результаты сравнения значений несущей способности свай и фрагментов свай, полученных в ходе статических испытаний и полученных расчетом. Расчет несущей способности выполнялся по стандартной методике [13], а также по усовершенствованной методике с использованием полученных значений коэффициента условий работы $\gamma_{sh,sal}$.

Таблица 5.2 – Несущая способность буровых свай

№	Свая	Несущая способность, кН			Температура, °С	
		испытание	$\gamma_{sh} = 0,7$ (%)	$\gamma_{sh,sal}$ (%)	средняя	под пятой
1	350-5,0	433	470 (116)	428 (106)	–0,7	–1,1
2	350-6,0	589	586 (107)	531 (97)	–0,9	–1,4
3	500-4,0	718	898 (134)	778 (116)	–1,2	–1,0
4	500-5,0	765	845 (118)	722 (100)	–0,8	–1,1
(%) — процентное отношение расчетного значения несущей способности сваи к значению, полученному по результатам статического испытания.						

Таблица 5.3 – Несущая способность фрагментов свай

№	d, мм	Несущая способность, кН			Температура, °С
		испытание	$\gamma_{sh} = 0,7$ (%)	$\gamma_{sh,sal}$ (%)	
1	350	35	30 (94)	28 (87)	–0,6
2	350	91	65 (79)	71 (86)	–2,7
(%) — процентное отношение расчетного значения несущей способности сваи к значению, полученному по результатам статического испытания.					

Из Таблиц 5.2 и 5.3 видно, что несущая способность свай и фрагментов диаметром 350 мм, определенная расчетом по усовершенствованной методике, отличается от опытных данных не более чем на 6 %. Несущая способность, определенная расчетом с единым коэффициентом, отличается от опытных данных на 6–21 % [62].

Для свай диаметром 500 мм несущая способность, определенная расчетом по усовершенствованной методике, отличается от опытных данных не более чем на 16 %. Несущая способность, определенная расчетом с единым коэффициентом, отличается от опытных данных на 18–34 %.

Результаты апробации усовершенствованной методики определения несущей способности буровых свай приведены на Рисунке 5.3.

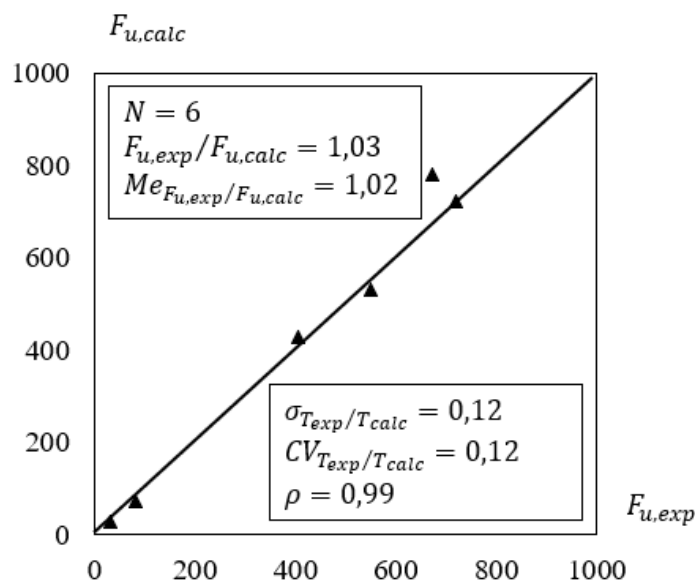


Рисунок 5.3 – Отношение опытного $F_{u,exp}$ и расчетного $F_{u,calc}$ значений несущей способности буровой сваи (фрагмента), кН

Достоверность расчета по усовершенствованной методике определения несущей способности буровой сваи в искусственно засоленном многолетнемерзлом грунте увеличивается на 40 %, коэффициент вариации уменьшился на 8 процентных пунктов. Однако из-за малого объема выборки оценка не является достаточно надежной. Для подтверждения статистической значимости выявленных различий и точной оценки достоверности результатов расчета требуется проверка на более крупной выборке опытных значений несущей способности свай, полученных по результатам статических испытаний.

5.3. Способ устройства буровой сваи в многолетнемерзлом грунте, исключаящий массообмен между бетоном и грунтом

В связи с тем, что массообмен между бетоном и грунтом при устройстве буровых свай влечет за собой засоление мерзлого основания и снижение его

несущей способности, проведен патентный поиск способов устройства свай без электро- или паропрогрева, исключаящих массообмен.

Установлено, что существует способ возведения буронабивных свай в грунтоцементной оболочке [94]. Способ включает проходку скважины полым шнеком, с последующим армированием, бетонированием, уплотнением импульсными разрядами и формированием грунтоцементной оболочки посредством подачи высоконапорного цементирующего раствора. Способ отличается от существующих тем, что грунтоцементную оболочку создают переменного поперечного сечения в соответствии с определенными в процессе бурения характеристиками грунтов, причем большее поперечное сечение оболочки формируют в областях пониженных механических свойств грунтов.

Формирование грунтоцементной оболочки производят при текущей скорости бурения, а выполнение большего диаметра грунтоцементной оболочки осуществляют за счет увеличения давления подаваемого цементирующего раствора.

Данный способ весьма сложен в технологическом отношении и предназначен для формирования свайных фундаментов в слабых грунтах, а также для укрепления слабых грунтов с использованием струйной технологии одновременно с возведением буронабивных свай. Однако он не предназначен для использования в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, т. к. не позволяет исключить массообмен между раствором и грунтом основания свай.

Другой способ возведения буронабивной сваи включает бурение скважины в грунте с использованием промывочной жидкости и последующее бетонирование ствола, отличается тем, что бурение скважины ведут с использованием в качестве промывочной жидкости водного раствора, гидролизованного полиакрилонитрила, а бетонирование осуществляют после образования на стенках скважины геля-камня [91].

Недостатком данного способа является наличие «мокрого» процесса промывки, осуществление которого при низких отрицательных температурах

наружного воздуха в районах распространения многолетнемерзлых грунтов технически сложно осуществимо.

Известна также буронабивная свая [92], содержащая железобетонный ствол с защитной оболочкой, отличающаяся тем, что железобетонный ствол сформирован в пластиковой трубе, являющейся защитной оболочкой.

Полезная модель относится к устройству свайных фундаментов в агрессивных средах и может быть использована при возведении сооружений в водонасыщенных грунтах. Использование в многолетнемерзлых грунтах не приведет к положительному результату, т. к. при этом все равно используется связующий раствор, заливаемый в зазор между защитной трубой и стенкой скважины, что приведет к массообмену. Кроме того, способ должен обеспечивать изготовление свай без элементов заводской готовности.

Известно устройство из геотекстильных материалов в качестве формирующей оболочки сваи, имеющей каркас, сооружаемой в скважине с обсадной трубой, отличающееся тем, что формирующая оболочка сваи выполнена в виде специального геотекстильного «чулка» из тканого полотна [90].

Полезная модель относится к производству фундаментных конструкций из буронабивных висячих свай. Однако ее недостатком является возможность массообмена раствора с грунтом через геотекстиль, что в конечном итоге приведет к снижению несущей способности свай. Кроме того, при бетонировании и расправлении «чулка» возможны неконтролируемые сужения и складки его в скважине, что может привести к снижению прочности ствола и несущей способности свай.

Согласно рекомендациям по устройству буронабивных свай в вечноммерзлых грунтах, последовательность работ по устройству висячих буронабивных свай сплошного сечения в многолетнемерзлом грунте включает: проходку скважины, установку арматурного каркаса, укладку бетонной смеси в скважину (с содержанием химических добавок) методом восходящего потока или сбрасыванием бетона [105]. Способ позволяет сформировать сплошной железобетонный элемент (сваю) в многолетнемерзлом грунте и обеспечить при

этом, благодаря химическим добавкам, набор прочности бетона в условиях отрицательных температур вмещающих грунтов, но не позволяет исключить массообмен раствора с грунтом через стенки и дно скважины.

Известен также способ устройства буронабивной сваи по аналогии с описанным в рекомендациях по устройству буронабивных свай в вечномёрзлых грунтах [105], отличающийся тем, что с целью снижения теплового влияния бетона на основание сваи перед бетонированием на дно скважины отсыпают слой щебня. Способ позволяет исключить массообмен только под пятой сваи.

Таким образом, все рассмотренные способы остаются достаточно трудо- и материалоемкими и не позволяют сформировать надежный железобетонный элемент (сваю) в условиях отрицательных температур многолетнемерзлых грунтов, исключив перенос солей химических добавок из раствора в окружающий грунт и обеспечив при этом максимально возможную несущую способность сваи.

В процессе исследования предложен способ устройства буровой сваи в многолетнемерзлом грунте, исключающий массообмен между раствором и грунтом [95].

Практическим результатом использования предлагаемого способа является повышение несущей способности буровых свай, устраиваемых с применением химических добавок для обеспечения набора прочности бетона, в многолетнемерзлых грунтах путем исключения массообмена за счет закупорки стенок и дна скважины защитным материалом.

Заявленный результат достигается тем, что перед бетонированием сваи на внутреннюю поверхность и дно пробуренной скважины наносят гидроизоляционный слой жидкого твердеющего при отрицательной температуре материала, обладающего адгезией с многолетнемерзлым грунтом, — например, жидкой резины. Затем осуществляют контроль достаточности толщины слоя для закупорки грунта путем пробного нагнетания воздуха в скважину.

На Рисунке 5.4 представлена технологическая схема устройства буровой сваи в многолетнемерзлом грунте по разработанному способу.

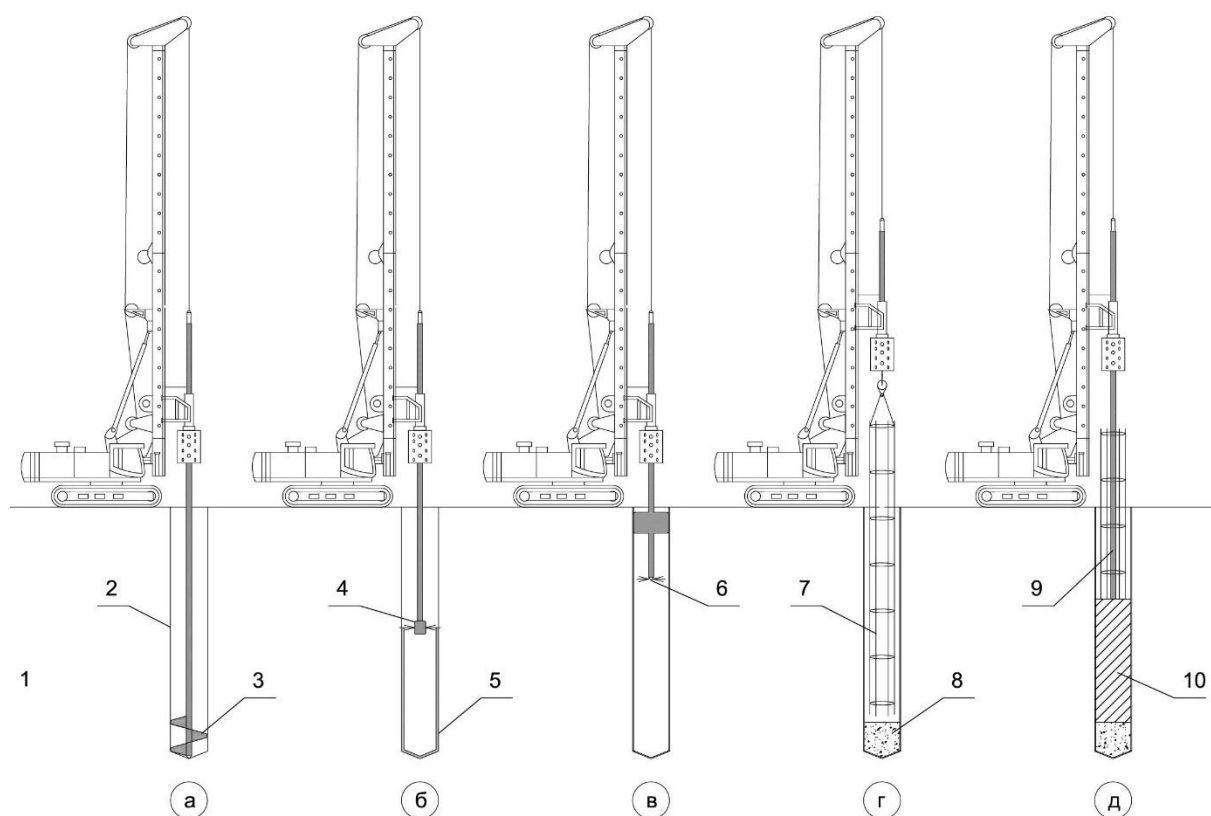


Рисунок 5.4 – Технологическая схема устройства буровой сваи в многолетнемерзлом грунте по разработанному способу:

1 — многолетнемерзлый грунт; 2 — грунт слоя сезонного оттаивания; 3 — скважина; 4 — породоразрушающий инструмент; 5 — иньектор; 6 — слой гидроизоляции; 7 — устройство пробного нагнетания; 8 — арматурный каркас; 9 — слой щебня; 10 — бетонолитная труба; 11 — бетон с химическими добавками;

а — бурение скважины; б — нанесение защитного гидроизолирующего слоя; в — контроль достаточности толщины защитного слоя; г — устройство щебеночной подушки и погружение арматурного каркаса; д — заполнение скважины бетоном с химическими добавками

Способ включает:

- Бурение скважины породоразрушающим инструментом с выемкой грунта без промывки, с очисткой забоя скважины.
- Установку обсадной трубы в пределах слоя сезонного оттаивания (при необходимости).
- Покрытие поверхности скважины слоем защитного гидроизолирующего материала, закрывающего поры грунта. Защитный гидроизоляционный слой наносят таким образом, чтобы не образовывалось пленки излишней

толщины, формирующей фиксированную поверхность среза, а происходила только закупорка стенок и дна скважины. При выполнении этого условия несущая способность сваи по ее боковой поверхности определяется параметром сопротивления мерзлого грунта сдвигу (грунт по грунту).

- Контроль достаточности покрытия для закупорки грунта гидроизолирующим материалом осуществляется путем нагнетания в скважину воздуха с избыточным давлением, равным среднему гидростатическому давлению от столба бетона в скважине, с температурой, равной исходной температуре воздуха в скважине, и последующим контролем отсутствия падения начального давления.
- Засыпку на дно скважины слоя щебня и его уплотнение с целью снижения теплового воздействия сваи на многолетнемерзлое основание.
- Установку арматурного каркаса.
- Заполнение скважины бетоном с химическими добавками, обеспечивающими его твердение в условиях отрицательных температур многолетнемерзлого основания.
- Формирование оголовка сваи (прогрев верхней части сваи, расположенной выше подошвы слоя сезонного оттаивания).
- Уход за бетоном оголовка сваи.

Эффективность разработанного способа подтверждена результатами испытаний на одноплоскостной срез в главе 3.

Выводы по главе 5

Результаты апробации усовершенствованной методики определения несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах и разработки способа их устройства позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Методика определения несущей способности свай усовершенствована путем введения коэффициента условий работы $\gamma_{sh,sal}$, учитывающего снижение предельно длительного сопротивления сдвигу грунтов основания при искусственном засолении. Частные значения коэффициента определяются в зависимости от степени засоленности грунта основания, изменяющейся во времени в зависимости от используемого состава раствора при изготовлении сваи и его начальной температуры, диаметра сваи, вида, начальной температуры и теплофизических свойств многолетнемерзлых грунтов.

2. Получено множество значений коэффициента $\gamma_{sh,sal}$ для принятого состава раствора и комплексной химической добавки. По сравнению с единым коэффициентом, равным 0,7, полученные значения для песков и супесей составили от 0,40 до 1,00, для суглинков и глин — от 0,56 до 1,00.

3. Апробация методики с использованием результатов статических испытаний фрагментов и натурных буронабивных свай показала, что достоверность расчета по усовершенствованной методике увеличивается на 40 %. Для подтверждения статистической значимости выявленных различий требуется проверка на более крупной выборке опытных значений несущей способности свай, полученных по результатам статических испытаний.

4. На основе результатов испытаний образцов с гидроизоляцией грунта защитным материалом, представленных в главе 3, разработан способ, обеспечивающий набор прочности бетона без электропрогрева и исключаящий возможность массообмена между бетоном и грунтом при устройстве буронабивной сваи в многолетнемерзлом грунте. На разработанный способ получен патент [95].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполненный анализ состояния вопроса исследования показал, что для обеспечения твердения материала буровых свай в многолетнемерзлых грунтах используются противоморозные или комплексные химические добавки. При устройстве таких свай наблюдается тепло- и массоперенос, приводящий к засолению и снижению несущей способности основания. Разработанные ранее решения не позволяют исключить засоление многолетнемерзлых грунтов на боковой поверхности сваи, поэтому задача определения несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах является необходимой и своевременной.

Сформулирована цель и основные задачи диссертационного исследования.

2. Показано, что использование единого значения коэффициента условий работы для определения несущей способности сваи не обеспечивает достаточную достоверность определения сопротивления сдвигу, общая погрешность расчета составляет более 25%. Поэтому усовершенствование методики предложено осуществить путем определения множества значений коэффициента для различных начальных условий.

С учетом поставленных задач разработана методология проведения и анализа результатов экспериментальных исследований.

Для сопоставления и обеспечения воспроизводимости результатов всего комплекса исследований принят единый состав бетона с комплексной химической добавкой, включающей формиат натрия в качестве противоморозного компонента (2% от массы цемента) и ПФМ-НЛК в качестве воздухововлекающего и пластифицирующего компонента (0,8% от массы цемента).

3. Предложен новый способ подготовки образцов для определения сопротивления сдвигу искусственно засоленных грунтов, включающий заливку цементного раствора положительной температуры, изготовленного с применением химической добавки, на мерзлый грунт как с использованием гидроизолирующего материала, так и без него.

Получены зависимости предельно длительного сопротивления сдвигу искусственно засоленных мерзлых глинистого и песчаного грунтов от температуры и степени засоленности для принятого состава комплексной химической добавки. Развита представления о закономерностях изменения прочностных свойств искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтов основания буровых свай.

4. На основании расчетно-теоретических исследований разработана методика предварительной оценки времени замерзания оснований, оттаявших в процессе устройства свай. В рамках технико-экономического сравнения вариантов конструктивных решений при проектировании методика позволяет оценить время замерзания оснований свай различных диаметров, при различных начальных температурах и теплофизических свойствах многолетнемерзлых грунтов с достоверностью порядка 15%.

5. Экспериментально установлено, что сдвиг в процессе нагружения происходит по поверхности грунт-грунт на контакте со сваей свай. Разработана схема расчета несущей способности свай, включающая три зоны. Зона «А» изменяемая область с максимальным значением степени засоленности и минимальным значением сопротивления грунта сдвигу. Зона «Б» изменяемая область, в пределах которой параметры находятся в некотором диапазоне. Зона «В» соответствует стабильной области грунта, в которой не происходит изменений параметров. Расчет рекомендовано выполнять по Зоне «А».

6. Экспериментально и научно обоснованы зависимости концентрации порового раствора грунтов вокруг свай на различные моменты времени. Определены величины степени засоленности грунтов основания свай различных диаметров с учетом сроков замерзания оттаявших оснований. Тем самым развиты представления о механизме и закономерностях изменения степени засоленности многолетнемерзлых грунтов основания буровых свай, изготовленных с применением химических добавок.

Результаты расчетов с использованием известной модели показали, что для сроков замерзания менее 1 суток концентрация не успевает значительным образом вырасти и находится в пределах 2%. При сроках более 1 суток концентрация

повышается и устанавливается на продолжительный период в размере половины от заданного начального значения.

7. Методика определения несущей способности свай усовершенствована путем введения в уравнение коэффициента условий работы $\gamma_{sh,sal}$, учитывающего снижение предельно длительного сопротивления сдвигу грунтов основания при искусственном засолении. Частные значения коэффициента определяются в зависимости от степени засоленности грунта основания, изменяющейся во времени в зависимости от используемой химической добавки, диаметра сваи, вида, начальной температуры и теплофизических свойств многолетнемерзлых грунтов.

8. Частные значения коэффициента $\gamma_{sh,sal}$ для принятой комплексной химической добавки получены как отношение сопротивления сдвигу засоленного и незасоленного мерзлого грунта. Полученные значения для песков и супесей составили от 0,46 до 1,00, для суглинков и глин – от 0,30 до 0,87, по сравнению с единым нормативным коэффициентом, равным 0,7.

9. Апробация методики с использованием результатов статических испытаний фрагментов и натурных буронабивных свай показала, что достоверность определения несущей способности по усовершенствованной методике увеличивается на 40%.

10. На основе результатов испытаний образцов с гидроизоляцией грунта жидкой резиной разработан и запатентован способ, обеспечивающий набор прочности бетона без электропрогрева и исключаящий возможность массообмена между бетоном и грунтом при устройстве буронабивной сваи в многолетнемерзлом грунте.

Определено, что при гидроизоляции грунта массообменные процессы исключаются, а предельно длительное сопротивление сдвигу увеличивается в 1,2-1,3 раза по сравнению с искусственно засоленными образцами.

Направления дальнейших исследований

В результате выполненного исследования выявлены особенности работы буровых свай, изготовленных с применением химических добавок, в многолетнемерзлых грунтах, установлены параметры, оказывающие наиболее существенное влияние на их работу, которые подтвердились результатами апробации и позволили выявить направления дальнейших исследований.

Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на решение следующих задач:

- изучение механизмов и закономерностей изменения прочностных свойств многолетнемерзлых грунтов основания буровых свай, изготовленных с применением других составов современных бетонов;
- изучение механизмов и закономерностей изменения деформационных характеристик грунтов основания буровых свай от степени засоленности при различных температурах;
- изучение изменения сил морозного пучения в результате засоления;
- развитие инженерных методов расчета температурного состояния оснований буровых свай;
- оценка эффективности применения других защитных материалов для гидроизоляции грунта с целью исключения массообменных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — М.: ФГУП Стандартиформ, 2019. — 2 с.
2. ГОСТ 5686-2020. Грунты. Методы полевых испытаний сваями. — М.: ФГУП Стандартиформ, 2020. — 12 с.
3. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. — М.: ФГУП Стандартиформ, 2018. — 7 с.
4. ГОСТ 12248.8-2020. Грунты. Определение характеристик прочности мерзлых грунтов методом среза по поверхности смерзания. — М.: ФГУП Стандартиформ, 2020. — 4 с.
5. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. — М.: ФГУП Стандартиформ, 2019. — 12 с.
6. ГОСТ 24211-2008 Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. — М.: ФГУП Стандартиформ, 2019. — 8 с.
7. ГОСТ 25358-2020. Грунты. Метод полевого определения температуры. — М.: ФГУП Стандартиформ, 2021. — 2 с.
8. ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения. — М.: ФГУП Стандартиформ, 2021. — 12 с.
9. ГОСТ Р 59540-2021. Грунты. Методы лабораторного определения степени засоленности. — М.: ФГУП Стандартиформ, 2021. — 4 с.
10. ГОСТ Р ИСО 2394-2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности. — М.: ФГУП Стандартиформ, 2016. — 9 с.
11. СП 22.13330-2016. Основания зданий и сооружений. — М.: Минстрой России, 2016. — 18 с.
12. СП 24.13330-2021. Свайные фундаменты. — М.: Минстрой России, 2021. — 10 с.
13. СП 25.13330-2020. Основания и фундаменты в вечномёрзлых грунтах. — М.: Минстрой России, 2020. — 21 с.

14. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. — М.: Минстрой России, 2017. — 59 с.
15. СП 45.13330.2017. Земляные сооружения, основания и фундаменты. — М.: Минстрой России, 2017. — 52 с.
16. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. — М.: Минстрой России, 2018. — 3 с.
17. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. — М.: Минстрой России, 2017. — 57 с.
18. СП 496.1325800.2020. Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Правила производства работ. — М.: Минстрой России, 2017. — 18 с.
19. Аксенов, В. И. Зависимость прочностных и физических свойств мерзлых песков от влажности / В. И. Аксенов, С. Г. Геворкян, В. В. Дорошин // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2017. — № 6. — С. 35–39. — EDN YOCDHG.
20. Аксенов, В.И. Засоленные мерзлые грунты Арктического побережья как основание сооружений. — Москва: Все о мире строительства, 2008. — 310 с.
21. Алексеев, А. Г. Буровые сваи, затворенные с применением химических добавок, в многолетнемерзлых грунтах / А. Г. Алексеев, Д. В. Зорин // Фундаменты. — 2022. — № 2 (8). — С. 33–35. — EDN IHKRZV.
22. Алексеев, А. Г. Зависимость пучинистости промерзающих грунтов от степени и состава засоления / А. Г. Алексеев // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2020. — № 5. — С. 12–15. — EDN DWRVYV.
23. Алексеев, А. Г. Методики определения сопротивления срезу по поверхности смерзания в лабораторных условиях / А. Г. Алексеев, Э. С. Гречищева, О. В. Козлова, А. А. Алексеева // Мониторинг в криолитозоне: сб. докл. Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов / Под ред. Р.Г. Мотенко. — Москва, 2022. — С. 968–972.

24. Алексеев, А. Г. О несущей способности буронабивных свай в многолетнемерзлых грунтах / А. Г. Алексеев, А. Н. Цеева, Д. В. Зорин, О. И. Матвеева // Геотехника. — 2024. — Т. 16, № 3. — С. 42–50. — EDN XFLTWI.
25. Алексеев, А. Г. Об изменении температурного состояния многолетнемерзлых пород в Таймырском районе Красноярского края / А. Г. Алексеев, Д. В. Зорин // Фундаменты. — 2020. — № 2. — С. 4–7. — EDN BCNFOA.
26. Алексеев, А. Г. Правила проектирования оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах по I принципу строительства / А. Г. Алексеев. — Москва, 2020. — 78 с.
27. Алексеев, А. Г. Применение свайных фундаментов в многолетнемерзлых грунтах / А. Г. Алексеев // Арктика: настоящее и будущее: Шестой международный форум. — Санкт-Петербург, 2016. — С. 215–221.
28. Алексеев, А. Г. Струйная цементация для устройства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах / А. Г. Алексеев, Д. В. Зорин, В. А. Алексеенко // Промышленное и гражданское строительство. — 2021. — № 8. — С. 27–32.
29. Бахолдин Б. В., Мамонов В. М. Совершенствование норм проектирования буронабивных свай // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1972. — № 6. — С. 21–22.
30. Березовский, Б. И. Строительное производство в условиях Севера //Л.: Стройиздат. — 1982. — С. 74.
31. Борозинец, В. Е. О возможности количественной оценки миграции влаги в глинистых грунтах при постоянной скорости промерзания / В. Е. Борозинец, Г. М. Фельдман // Криогенные процессы. — М., 1978. — С. 170–176.
32. Бояринцев, А. В. Оценка эффективности способа повышения несущей способности свай по грунту / А. В. Бояринцев // Вестник гражданских инженеров. — 2021. — № 2 (85). — С. 75–84. — EDN WDURIR.
33. Брушков, А. В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства, М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. — С. 241–242.

34. Брушков, А. В., Лепинских Г. В., Николаев А. А. О прочности засоленных грунтов полуострова Ямал, М.: Наука, 1990. — С. 115–120.
35. Брушков, А. В., Николаев А. А., Томина Г. А. О прочности смерзания мерзлых засоленных грунтов Ямала, Ленинград: Основания и фундаменты жилых и общественных зданий в северных районах, 1990. — С. 50–55.
36. Бугрим, С. Ф. Особенности твердения бетона в вечномерзлых грунтах // II Международный симпозиум по зимнему бетонированию. — М.: Стройиздат, 1975. — Т. 1. — С. 23–33.
37. Велли, Ю. Я., Карпунина, А. А. Засоленные вечномерзлые грунты как основания сооружений. — Вторая Международная конференция по мерзлотоведению: Доклады и сообщения. Вып. 7. — Якутск: Якутское книжное изд-во, 1973. С. 49–56.
38. Велли, Ю. Я. Исследование засоленных вечномерзлых грунтов Арктического побережья (Обзор). — Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. — М.: Наука, 1990. — С. 9–20.
39. Велли, Ю. Я., Гришин, П. А., Яркин, А. Н. Исследования изменения засоленности грунта в основании свай при различных способах ее погружения. — Исследования и расчет сейсмостойких зданий и их фундаментов на вечномерзлых грунтах. — Л.: ЛенЗНИИЭП, 1982. — С. 136–140.
40. Велли, Ю. Я., Гришин, П. А., Яркин, А. Н. К оценке несущей способности основания фундаментов на засоленных вечномерзлых грунтах с учетом перераспределения солей в результате диффузии. — Фундаменты жилых и общественных зданий на вечномерзлых грунтах. — Л.: ЛенЗНИИЭП, 1987. — С. 18–20.
41. Велли, Ю. Я., Гришин, П. А. О несущей способности вечномерзлых засоленных грунтов. — Труды СоюзМорНИИпроекта. Вып. 3, 1963. — С. 16–34.
42. Винокуров, А. Т. Исследование свойств бетона буронабивных свай и миграции солей из бетона в вечномерзлый грунт / А. Т. Винокуров, О. И. Матвеева,

- Г. Д. Федорова // Бетон и железобетон — взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 томах, Москва, 12–16 мая 2014 года. Том 3. — Москва: Московский государственный строительный университет, 2014. — С. 261–270.
43. ВСН-01-76. Инструкция по проектированию и устройству буронабивных свай-стоек в вечномёрзлых грунтах района Норильска. — Красноярск: Минцветмет СССР, 1977. — 6 с.
 44. ВСН 83-92. Технические указания по применению бетонов и цементно-песчаных растворов, твердеющих на морозе, при строительстве искусственных сооружений. — М.: ПКТИТрансстрой, 1993. — 16 с.
 45. Вялов, С. С. Длительное разрушение мерзлых грунтов как термоактивированный процесс. — Вторая Международная конференция по мерзлотоведению: доклады и сообщения. Вып. 4. — Якутск: Якутское книжное изд-во, 1973. — С. 16–26.
 46. Вялов, С. С. Реология мерзлых грунтов. — М.: Стройиздат, 2000.
 47. Гольдштейн, М. Н. Ползучесть и длительная прочность глинистых пород. — Труды совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения. Т. 2. — М.: Изд-во АН СССР, 1957.
 48. Городецкий, С. Э. Ползучесть и прочность мерзлых грунтов при сложном напряженном состоянии. — Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1975. — № 5. — С. 39–43.
 49. Готман А. Л., Гавриков М. Д. Исследование особенностей работы вертикально нагруженных длинномерных буронабивных свай и их расчет // Construction and Geotechnics. — 2021. — Т. 12. — № 3. — С. 72–83.
 50. Гречищев, С. Е., Чистотинов Л. В., Шур Ю. Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз / С. Е. Гречищев, Л. В. Чистотинов. — М.: Недра, 1980. — 383 с.
 51. Гущин, С. В., Дрозд, А. А. Влияние формиата натрия на твердение бетона при отрицательных температурах. — Современные проблемы бетона и

- железобетонных конструкций: сборник научных трудов. Вып. 3. — Минск: Институт БелНИИС, 1963. — С. 16–34.
52. Далматов, Б. И. Искусственное засоление грунтов в строительстве / Б. И. Далматов, В. С. Ласточкин. — Ленинград: Стройиздат, 1966. — 132 с.
 53. Дзагов, А. М. Разработка способа расчета сопротивления оснований буронабивных свай с учетом процесса твердения бетона: дис. ... канд. техн. наук / А. М. Дзагов. — Л., 1986. — 22 с.
 54. Докучаев, В. В. Расчет фундаментов на вечномерзлых грунтах по предельным состояниям. — Л.: Стройиздат, 1968.
 55. Докучаев, В. В., Маркин, К. Ф. Свайные фундаменты в вечномерзлых грунтах. — Л.: Стройиздат, 1972.
 56. Ермошкин П. М., Сайкина Т. В. Пути повышения эффективности и качества фундаментов из буронабивных свай // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1976. — № 6. — С. 10-14.
 57. Ершов, Э. Д. Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах: дис. ... д-ра геол.-минер. наук / Э. Д. Ершов. — М., 1977. — 452 с.
 58. Ефимов, В. М., Рожин, И. И., Попенко, Ф. Е., Попенко, Ф. Е., Степанов, А. В., Степанов, А. А., Васильчук, Ю. К. — Устройство буронабивных свай в условиях криолитозоны центральной Якутии // Арктика и Антарктика. — 2018. — № 1. — С. 133–141.
 59. Жуков В. Ф., Максимов Г. Н. Рекомендации по рациональной области применения в строительстве свай различных видов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1979. — № 1. — С. 31.
 60. Зарецкий, Ю. А. Экспериментальные методы исследования тепловлагопереноса в промерзающих грунтах и математическое моделирование этих процессов / Ю. А. Зарецкий, С. А. Лавров // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. — Л., 1984. — С. 115–121.
 61. Зорин, Д. В. Время замерзания основания одиночной буровой сваи в мерзлом грунте, оттаявшем в процессе ее устройства / Д. В. Зорин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2025. — № 4. — С. 44–55.

62. Зорин, Д.В., Алексеев А.Г. Сопротивление сдвигу многолетнемерзлых грунтов, засоленных при устройстве буронабивных свай / Д.В. Зорин, А.Г. Алексеев // Жилищное строительство. — 2025. — № 9. — С. 29–33.
63. Исаев, О. Н. и др. Разработка рекомендаций по выполнению инженерно-геологических изысканий в Арктической зоне // Вестник НИЦ «Строительство». — 2021. — Т. 29. — № 2. — С. 58–75.
64. Испирян, Р. А. Массоперенос в промерзающем грунте // Физика процессов торфяного производства / Р. А. Испирян, Н. М. Пузырев. — Калинин, 1980. — С. 48–52.
65. Карпов, В. М., Велли, Ю. Я. Сопротивление мерзлых засоленных грунтов сдвигу. — Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1968. — № 4. — С. 22–24.
66. Кауркин, В. Д. Применение гидратационного тепловыделения бетона буронабивных свай при использовании грунтов основания по Принципу II / В. Д. Кауркин, А. И. Харичкин, А. В. Иоспа // Вестник НИЦ Строительство. — 2022. — № 3 (34). — С. 103–113. — EDN KFYXOY.
67. Колыбин, И. В., Алексеев, А. Г., Зорин, Д. В. и др. Исследование взаимодействия буроинъекционных свай с многолетнемерзлым грунтом (ММГ). Отчет о научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе. — Москва: АО «НИЦ «Строительство», 2018. — 194 с.
68. Колыбин, И. В., Алексеев, А. Г., Зорин, Д. В. и др. Разработка беспрогревного способа устройства буронабивных свай в многолетнемерзлых грунтах. Отчет о научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе. — Москва: АО «НИЦ «Строительство», 2020. — 212 с.
69. Комаров, А. К. Выдерживание бетона комбинированных свай в вечномерзлых грунтах: дис. ... к-та техн. наук / А. К. Комаров. — М., 1991. — 39 с.
70. Конаш В. Е. Свайные фундаменты в условиях островного распространения вечномерзлых грунтов (на примере Магадана) // Л.: Стройиздат, 1977.
71. Коновалов, А. А. Прочностные свойства мерзлых грунтов при переменной температуре, Новосибирск: Наука, 1991. — 33 с.

72. Коронов, П. В. Бетон с противоморозными добавками для свай стоек в вечномерзлых грунтах, используемых по 1 принципу: автореферат дис. ... к-та техн. наук / П. В. Коронов. — М., 1994. — 9 с.
73. Костиненко, Г. И. Свайные фундаменты на вечномерзлых грунтах. (Опыт США и Канады). — М.: Стройиздат, 1968.
74. Костяев, П. С., Курушин, А. Д., Афанасьев, С. Г., Аммосов, П. В. Кондуктометрические исследования миграции растворов антифризов из бетона с противоморозными добавками в контактирующий с ним мерзлый грунт // Труды МИИТ. — 1982. — № 714. — С. 62–66.
75. Кроник, Я. А. Искусственное засоление грунтов для борьбы с морозным пучением / Я. А. Кроник, С. Б. Ухов, Н. А. Цытович // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1969. — № 1. — С. 22–26.
76. Кудрявцев, В. А. Миграция влаги в дисперсных грунтах различного состава, строения, сложения и свойств / В. А. Кудрявцев, Э. Д. Ершов, В. Г. Чеверев // II международная и конференция по мерзлотоведению: докл. и сообщения. — Якутск, 1973. — Вып. 4. — С. 125–134.
77. Курушин, А. Д. Взаимодействие бетонов, содержащих противоморозные добавки, с вечномерзлым грунтом: дис. ... д-ра техн. наук / А. Д. Курушин. — М., 1994. — 160 с.
78. Лебеденко, Ю. П. Миграция ионов и обратный осмос в мерзлых породах. — Проблемы геокриологии. — М.: Наука, 1988. — С. 43–45.
79. Лукина, Ф. Х. Бетон с комплексными добавками для устройства буронабивных висячих свай в вечномерзлых грунтах: автореферат дис. ... к-та техн. наук / Ф. Х. Лукина. — М., 1987. — 13 с.
80. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. — Москва: Гостехиздат, 1954. — 296 с.
81. Марков, Е. В., Пульников, С. А., Гербер, А. Д. Разработка математической модели массопереноса компонент водно-солевого раствора в пучинистых грунтах на основании кинетической теории жидкостей // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика. — 2018. — № 1. — С. 37–44.

82. Матвеева, О. И. Однородность бетона буронабивных свай при их устройстве методом свободного сброса / О. И. Матвеева, А. Т. Винокуров, Г. Д. Федорова // Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение: сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции, Якутск, 03–04 марта 2014 года / Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова. — Якутск: Международный центр научно-исследовательских проектов, 2014. — С. 316–322.
83. Миграция химических элементов в мерзлых породах / Е. М. Чувилин, О. Г. Смирнова // Материалы Первой конференции геокриологов России, Москва, 03–05 июня 1996 года. — Москва: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Издательский Дом (Типография), 1996. — С. 116–129.
84. Миренбург, Ю. С. Исследование работы свай и разработка укоренного метода их испытаний в пластичномерзлых грунтах: дис. ... к-та техн. наук / Ю. С. Миренбург. — М., 1979. — 267 с.
85. Набережный, А. Д. Исследование несущей способности мерзлых грунтов основания ребристых буроопускных свай: специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение»: дис. ... к-та техн. наук / А. Д. Набережный. 2018. — 101 с.
86. Набережный, А. Д. Разработка свай с повышенной несущей способностью в мерзлых грунтах / А. Д. Набережный, Г. П. Кузьмин // Геонауки: проблемы, достижения и перспективы развития: материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Якутск, 27–28 апреля 2018 года. — Якутск: Издательский дом СВФУ, 2018. — С. 145–148.
87. Налетова, Н. С. Массоперенос и криогенное структуро- и текстурообразование в промерзающих засоленных породах: автореферат дис. ... к-та геол.-мин. наук / Н.С. Налетова. — М., 1996. — 25 с.
88. Особенности применения технологии ТИТАН в многолетнемерзлых грунтах / А. Юнкер // Современные технологии проектирования и строительства

- фундаментов на многолетнемерзлых грунтах: сборник докладов международной научно-технической конференции, Москва, 07–08 сентября 2016 года. — Москва: Международная Ассоциация Фундаментостроителей, 2016. — С. 32–34.
89. Остроумов, В. Е. Перенос солей в мерзлых дисперсных грунтах под действие градиента температуры. Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. — М.: Наука, 1990. — С. 45–55.
 90. Патент № 114468 U1 Российская Федерация, МПК E02D 5/34. Устройство из геотекстильных материалов в качестве формирующей оболочки свай: № 2011112122/03: заявл. 30.03.2011: опубл. 27.03.2012 / А. Ф. Юдина, Н. В. Розанцева.
 91. Патент № 2032797 C1 Российская Федерация, МПК E02D 5/36. способ возведения буронабивной свай: № 5044616/33: заявл. 27.04.1992: опубл. 10.04.1995 / М. Л. Корстен, Ю. Х. Эсинурм.
 92. Патент № 204490 U1 Российская Федерация, МПК E02D 5/22. Буронабивная свая: № 2020138807: заявл. 25.11.2020: опубл. 27.05.2021 / О. М. Преснов, М. В. Залетова.
 93. Патент № 2303102 C1 Российская Федерация, МПК E02D 5/34. способ возведения буронабивной свай: № 2005140989/03: заявл. 28.12.2005: опубл. 20.07.2007 / И. С. Арутюнов, А. Ю. Калганов, А. Е. Пушкарев, В. А. Пушкарев.
 94. Патент № 2720047 C1 Российская Федерация, МПК E02D 5/34. Способ возведения буронабивной свай в грунтоцементной оболочке: № 2019129899: заявл. 23.09.2019: опубл. 23.04.2020 / Н. С. Соколов, А. Н. Михайлов, А. Е. Пушкарев и др.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственная фирма «ФОРСТ» (ООО «НПФ «ФОРСТ»).
 95. Патент № 2803751 C1 Российская Федерация, МПК E02D 5/34. Способ устройства буронабивной свай в многолетнемерзлом грунте: № 2023107219: заявл. 27.03.2023: опубл. 19.09.2023 / И. К. Попсуенко, А. Г. Алексеев, Д. В. Зорин; заявитель Акционерное общество «Научно-исследовательский центр «Строительство».

96. Пекарская, Н. К. Прочность мерзлых грунтов при сдвиге и ее зависимость от текстуры. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 108 с.
97. Полуэктов, В. Е., Меженский, В. И. Обобщение опыта возведения фундаментов в сложных геокриологических условиях // Инженерное мерзлотоведение. — 1979. — С. 54.
98. Порхаев, Г. В., Таргулян, Ю. О. Повышение эффективности устройства свайных фундаментов в мерзлых грунтах. — М.: Стройиздат, 1972.
99. Провести научно-исследовательские работы по совершенствованию технологии ускорения твердения бетона в монолитных конструкциях в районах с вечномерзлыми грунтами и дать предложения для разработки проекта ведомственных нормативных документов по возведению железобетонных монолитных конструкций с применением эффективных способов ускорения твердения бетона. Заключительный отчет о НИР. — Якутск: ЯНИФ института «ЗабайкалпромстройНИИпроект», 1985. — 136 с.
100. Проектирование и устройство буронабивных свай в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. СТО-04786546-019-2016. Якутск: АО «ЯкутПНИИС», типогр. ООО «Компания» Дани-Алмас». — 39 с.
101. Пронозин Я. А. Использование буроинъекционных свай в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов / Я. А. Пронозин, А. П. Малышкин, И. С. Сальный // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике, Салехард, 03–12 ноября 2021 года. — Салехард: б. и., 2021. — С. 353–356. — EDN JAUKKL.
102. Разводовский, Д. Е., Скорилов, А. В. Проблемы и возможные пути развития нормативной литературы в области проектирования свайных фундаментов // Вестник НИЦ «Строительство». — 2020. — Т. 26. — № 3. — С. 74–85.
103. Рекомендации по приготовлению и применению бетонов с комплексными добавками при бетонировании буронабивных монолитных свай в вечномерзлых грунтах. — М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1989. — 11 с.

104. Рекомендации по технологии устройства и теплотехническим расчетам буронабивных и комбинированных свай в вечномёрзлых грунтах. — М.: ВНИИОСП Госстроя СССР, 1990. — 9 с.
105. Рекомендации по устройству буронабивных свай в вечномёрзлых грунтах. — Якутск: ИМЗ СО РАН, 1991. — 40 с.
106. Роман, Л. Т. Влияние засоленности на кинетику разрушения мерзлых грунтов / Л. Т. Роман, Д. Н. Кривов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2007. — № 5. — С. 27–29.
107. Руководство по бетонированию фундаментов и коммуникаций в вечномёрзлых грунтах с учетом твердения бетона при отрицательных температурах. — М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1982. — 29 с.
108. Рязанов, А. В. Особенности расчета температурного режима многолетнемерзлых грунтов оснований буронабивных свай мостовых переходов / А. В. Рязанов, А. А. Усачев // Фундаменты. — 2021. — № 4 (6). — С. 49–51. — EDN ZVHOKS.
109. Садовский, А. В. Прочность смерзания грунтов с материалом фундамента // Вторая Международная конференция по мерзлотоведению: доклады и сообщения. Вып. 7. — Якутск: Якутское книжное изд-во, 1973. — С. 210–214.
110. Сазонов, П. М. Применение цементно-песчаного раствора при буроопускном способе погружения свай в многолетнемерзлые грунты / П. М. Сазонов, А. Г. Алексеев // Современные технологии проектирования и строительства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах: сборник докладов международной научно-технической конференции, Москва, 07–08 сентября 2016 года. — Москва: Международная Ассоциация Фундаментостроителей, 2016. — С. 19–23. — EDN WJQFHP.
111. Соловьев, Д. Ю. и др. Экспериментальные исследования несущей способности анкерных свай и расчетные методы ее определения // Геотехника. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 44–55.
112. Сорочан, Е. А. Основания и фундаменты, подземные сооружения. — М.: Стройиздат, 1985. — 480 с.

113. Сумгин, М. И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР / М. И. Сумгин. — М.: Изд-во АН СССР, 1937. — 379 с.
114. Таргулян, Ю. О. Устройство свайных фундаментов в вечномёрзлых грунтах. — Л., Стройиздат, 1978. — 160 с.
115. Тер-Мартirosян, З. Г. Осадка и длительная несущая способность свай / З. Г. Тер-Мартirosян, А. З. Тер-Мартirosян, Л. Ю. Ермошина // Промышленное и гражданское строительство. — 2021. — № 9. — С. 18–23.
116. Тютюнов, И. А. Природа миграции влаги в грунтах при промерзании и основы физико-химических приемов борьбы с пучением / И. А. Тютюнов, З. А. Нерсесова. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — С. 148–156.
117. Ухов, С. Б. Об искусственном передвижении NaCl в покровном суглинке // НДВШ. — 1958. — № 4. — С. 12–14.
118. Федосеева, В. И. Физико-химические закономерности миграции элементов в мерзлых грунтах и снеге. — Якутск, 2003. — 138 с.
119. Хрусталеv, Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне: учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению 511000 «Геология» и специальности 011400 «Гидрогеология и инженер. геология» / Л. Н. Хрусталеv. — Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2005. — 542 с.
120. Цеева, А. Н., Мегин, И. Д. и др. Разработка эффективных типов фундаментов и методов устройства оснований, обеспечивающих устойчивость зданий при увеличении глубины сезонного протаивания грунтов. Окончательный отчет о результатах научно-исследовательских работ. — Якутск: ОАО «ЯкутПНИИС», 2011. — 35 с.
121. Цеева, А. Н. Формирование температурного режима грунтов многолетнемерзлого основания буроопускных свай / А. Н. Цеева, О. И. Матвеева, Н. П. Семенова // Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в условиях Арктики: тезисы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ и ЯАССР, д. т. н., профессора Э. А. Бондарева, Якутск, 12–17 июля 2021 года. — Киров:

- Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2021. — С. 56–58.
122. Цытович, Н. А. К вопросу расчета фундаментов сооружений, возводимых на вечной мерзлоте / Н. А. Цытович. — Ленинград: Гос. ин-т по проектированию новых металлич. заводов, 1928 (тип. Гидрографич. упр-ния в.-морских сил РККА). — 67 с.
 123. Цытович, Н. А. Механика мерзлых грунтов / Н. А. Цытович. — М.: Высшая школа, 1973. — 446 с.
 124. Цытович, Н. А. Основания и фундаменты на мерзлых грунтах / Н. А. Цытович. — М.: Изд-во АН СССР, 1958. — 168 с.
 125. Цытович, Н. А., Кроник Я. А., Маркин К. Ф. Физические и механические свойства засоленных грунтов // Вторая Международная конференция по мерзлотоведению: доклады и сообщения. Вып. 4. — Якутск: Якутское книжное изд-во, 1973. — С. 40–52.
 126. Чеверев, В. Г. Природа криогенных свойств грунтов / В. Г. Чеверев // Научный мир. — М., 2004. — 233 с.
 127. Шарафутдинов, Р. А., Мирсаяпов, И. Т. Несущая способность и деформации грунтовых оснований, армированных вертикальными и горизонтальными элементами // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. — 2016. — Т. 2. — С. 197–204.
 128. Шулятьев, О. А., Дзагов, А. М., Минаков, Д. К. Изменение напряженно-деформированного массива грунта в результате устройства буронабивных свай и баретт // Вестник НИЦ «Строительство». — 2022. — Т. 34, № 3. — С. 26–44.
 129. Щегольков, Ю. Г. Исследования работы камуфлетных свай в талых и пластичномерзлых грунтах г. Магадана // Труды ВНИИ-1. — Магадан: Изд-во ВНИИ-1. — 1969. — Т. 29. — С. 237–271.
 130. Aksenov, V. I., Kal'bergenov, R. G., Leonov, A. R. Strength characteristics of frozen saline soils // Soil Mechanics and Foundation Engineering. — 2003. — Т. 40, № 2. — С. 55–59.

131. Aldaeef, A. A., Rayhani, M. T. Adfreeze strength and creep behavior of pile foundations in warming permafrost // *Advances in Analysis and Design of Deep Foundations: Proceedings of the 1st GeoMEast International Congress and Exhibition, Egypt 2017 on Sustainable Civil Infrastructures 1.* – Springer International Publishing, 2018. – C. 254–264.
132. Aldaeef, A. A., Rayhani, M. T. Interface shear strength characteristics of steel piles in frozen clay under varying exposure temperature // *Soils and Foundations.* – 2019. – T. 59, № 6. – C. 2110–2124.
133. Alekseev, A. et al. Application of pile foundations in structurally unstable soils // *MATEC Web of Conferences.* – EDP Sciences, 2019. – T. 265. – C. 05020.
134. Alekseev, A., Zorin, D. Interaction of the augercast micropiles with permafrost // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – IOP Publishing, 2018. – T. 365, № 4. – C. 042056.
135. Alyavdin, D. et al. Reline Jacket: Efficient Reduction of Frost-Heave Uplift of Piles in Warming Permafrost // *Geosciences.* – 2022. – T. 12, № 9. – C. 313.
136. Andersland, O. B., Ladanyi, B. *Frozen ground engineering.* – John Wiley & Sons, 2003.
137. Anderson, D. M., Morgenstern, N. R. *Physics, chemistry and mechanics of frozen ground: A review* // *Proceedings of the Second International Conference on Permafrost.* – National Academy of Sciences Washington, DC, 1973. – C. 257–288.
138. Biggar, K. W. *Adfreeze and grouted piles in saline permafrost,* 1993.
139. Biggar, K. W., Sego, D. C. Field pile load tests in saline permafrost. I. Test procedures and results // *Canadian Geotechnical Journal.* – 1993. – T. 30, № 1. – C. 34–45.
140. Biggar, K. W., Sego, D. C. Field pile load tests in saline permafrost. II. Analysis of results // *Canadian Geotechnical Journal.* – 1993. – T. 30, № 1. – C. 46–59.
141. Brouchkov, A. Frozen saline soils of the Arctic coast: Their distribution and engineering properties // *Proceedings of the eighth international conference on permafrost, Zurich, Switzerland.* – 2003. – T. 7. – C. 95–100.

142. Chuvilin, E. M. Migration of ions of chemical elements in freezing and frozen soils //Polar record. – 1999. – T. 35, № 192. – C. 59–66.
143. Chuvilin, E. et al. Migration of Salt Ions in Frozen Hydrate-Saturated Sand: Effect of Silt and Clay Particles //Energy & Fuels. – 2023. – T. 37, № 7. – C. 5331–5340.
144. Dourado, J. B. O. L. et al. Foundations in Permafrost of Northern Canada: Review of Geotechnical Considerations in Current Practice and Design Examples // Geotechnics. – 2024. – T. 4, № 1. – C. 285–308.
145. Ershov, E. D. et al. Mass Transfer and Deformation Processes in Frozen Rocks Interacting with Aqueous Salt Solutions (Published in Russian) // Proceedings of the III Scientific and Technical Workshop “Engineering-Geological Study and Evaluation of Frozen, Freezing and Thawing Soils (IGK-92)”, St. Petersburg, Russia. – 1993. – C. 67–77.
146. Fedorova, G. D., Matveeva, O. I., Prokopiev, R. B. Application Experience of Bored Micropiles in the Conditions of Permafrost Soil //Applied Mechanics and Materials. – 2018. – T. 878. – C. 104–109.
147. Fish, A. M. Deformation and failure of frozen soils and ice at constant and steadily increasing stresses // Proc. Fourth Canadian Permafrost Conference. – 1982. – C. 4–6.
148. Fleming, K. et al. Piling engineering. – CRC press, 2008.
149. Gao, Q. et al. A creep model of pile-frozen soil interface considering damage effect and ice effect //International Journal of Damage Mechanics. – 2022. – T. 31, № 1. – C. 3–21.
150. Gao, Q. et al. Experimental Study on the Rheology and Cryo-Mechanism of Pile-Frozen Soil Interface // Geofluids. – 2022. – T. 2022.
151. Harris, S. A., Brouchkov, A., Guodong, C. Geocryology: characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms. – CRC press, 2017.
152. Hass, H., Jagow-Klaff, R., Wernecke, R. Influence of salinity on the strength of various frozen soils // Current Practices in Cold Regions Engineering. – 2007. – C. 1–12.

153. Heydinger, A. G. Piles in permafrost // Journal of cold regions engineering. – 1987. – T. 1, № 2. – C. 59–75.
154. Hivon, E. G., Sego D. C. Strength of frozen saline soils // Canadian Geotechnical Journal. – 1995. – T. 32, № 2. – C. 336–354.
155. Johnston, G. H. Pile construction in Permafrost // Nrc Div Bldg Res Tech Papers/Can/. – 1963.
156. Karpov, V. M., Velli, Y. Y. Displacement resistance of frozen saline soils // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 1968. – T. 5, № 4. – C. 277–279.
157. Kay, B. D. State of the art: Heat and mass transfer in frozen soils // Proceedings of the 5th International Symposium on Ground Freezing, Rotterdam, Netherlands. – 1988. – C. 3–21.
158. Linell, K. A. Design and construction of foundations in areas of deep seasonal frost and permafrost. – US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1980. – T. 80, № 34.
159. Liu, J. K., Wang, T. F., Wen, Z. Research on pile performance and state-of-the-art practice in cold regions // Sciences in Cold and Arid Regions. – 2018. – T. 10, № 1. – C. 1–11.
160. Matveeva, O. I. et al. Ensuring Hardening of Cement Injecting Mortar at the Installation of Grout-injected Micropiles in Permafrost Soils // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – T. 463. – № 3. – C. 032009.
161. Mirenburg, Y. S., Maksimyak, R. V. Determination of Rheologic Characteristics of Frozen Soils and Beds by Relaxation Tests // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2002. – T. 39, № 2. – C. 72–79.
162. Mirenburg, Y. S. Effect of Load and Temperature Variability on the Bearing Capacity of Frozen Beds // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2001. – T. 38. – C. 176–182.
163. Nguyen, A. D. et al. The dependence of strength and modulus of frozen saline sand on temperature, strain rate and salinity // Proceedings of the 63rd Canadian Geotechnical Conference. Calgary. – 2010. – C. 467–475.

164. Nixon, J. F., McRoberts, E. C. A design approach for pile foundations in permafrost // Canadian Geotechnical Journal. – 1976. – T. 13, № 1. – C. 40–57.
165. Phillips, M. Avalanche defence strategies and monitoring of two sites in mountain permafrost terrain, Pontresina, Eastern Swiss Alps // Natural Hazards. – 2006. – T. 39. – C. 353–379.
166. Pronozin, Y. A. et al. Cementation of soils by wristband-pipe injection technology in conditions of thawing perpetually frozen soils // Construction and Geotechnics. – 2023. – T. 14, № 3. – C. 107–120.
167. Sadovsky, A. V., Maksimyak, R. V., Razbegin, V. N. State of the art: mechanical properties of frozen soil // Ground Freezing. – 1988. – T. 88, № 2. – C. 443–463.
168. Sheeran, D. E., Yong, R. N. Water and salt redistribution in freezing soils // Proceedings Conference on Soil Water Problems in Coldregions. – 1975. – T. 1975.
169. Shi, R. et al. Effect of freeze–thaw cycles on the performance of cast-in-place piles in permafrost regions: working state and action effect sharing // Permafrost and Periglacial Processes. – 2022. – T. 33, № 2. – C. 147–159.
170. Velli, Y. Y., Karpunia, A. A. Saline permafrost as bearing ground for construction // Washington: National Academy of Sciences, 1973.
171. Vyalov, S. S. et al. Frozen soil deformations and failure under different loading // Proceedings of the Fifth International Symposium on Ground Freezing. Balkema, Rotterdam. – 1989. – C. 465–471.
172. Vyalov, S. S., Slepak, M. E. Rheological regularities in frozen soil mechanics and their application in engineering calculations // International conference on rheology and soil mechanics. – 1988. – C. 219–232.
173. Vyalov, S. S., Slepak, M. E., Lunev, M. V. Single Pile and Pile Group in Permafrost // Cold Regions Engineering: Proceedings of the Sixth International Specialty Conference. – American Society of Civil Engineers, 1991. – 44 p.
174. Vyalov, S. S. et al. Stress-strain behavior of frozen soils // Proceedings of the Fifth International Conference on Permafrost, Trondheim. – 1988. – C. 1186–1191.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Справки о внедрении результатов диссертационной работы



**УДОКАНСКАЯ
МЕДЬ**

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по капитальному строительству

ООО «Удоканская медь»



В.В. Чухлебов

«14» сентября 2025 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
«Несущая способность буровых свай
в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах»
Зорина Дмитрия Васильевича

Научные исследования Зорина Д.В., проведенные в рамках подготовки диссертационной работы на тему: «Несущая способность буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах», использовались в рамках научно-технического сопровождения инженерных изысканий и проектной документации по реконструкции корпуса крупного дробления №1 с разворотной площадкой на объекте «Горно-металлургический комбинат «Удокан».

Полученные Зориным Д.В. экспериментальные и теоретические данные позволили обосновать принятое техническое решение по устройству буронабивных свай в условиях многолетнемерзлых грунтов.

Директор по управлению проектированием

Н.А. Варыгина



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «ГТК «ГТС»
Смирнов И. А.
_____ 2025 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы
Зорина Дмитрия Васильевича
«НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ БУРОВЫХ СВАЙ В ИСКУССТВЕННО
ЗАСОЛЕННЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ»

Результаты экспериментальных и теоретических исследований, полученные Зориным Дмитрием Васильевичем в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему: «Несущая способность буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах», успешно применены при разработке конструктивных решений по инженерной защите территорий с использованием буронабъекционных микросвай на объектах Айхальского и Олимпиадинского горно-обогатительных комбинатов, а также горно-металлургического комбината «Удокан».

Выполненные исследования позволили разработать оптимальные решения по устройству защитных сооружений от опасных склоновых процессов, а также противолавинных сооружений, сочетающие надежность и экономичность.



В диссертационный совет
54.1.002.01 (Д 303.020.02),
созданный на базе
АО «НИЦ «Строительство»
по адресу: 109428, г. Москва,
2-я Институтская ул., д.6

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы Зорина Дмитрия Васильевича на тему: «Несущая способность буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук использованы при разработке следующих нормативных документов.

1. СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечноммерзлых грунтах» автор принимал участие в составе коллектива в разработке раздела 6 «Основные положения проектирования оснований и фундаментов».

2. СП 496.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Правила производства работ» принимал участие в составе коллектива в разработке всего документа и, в частности, раздела 7 «Основные требования к устройству фундаментов зданий и сооружений».

Генеральный директор
АО «НИЦ «Строительство»



В.Г. Крючков

АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»:
109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6
тел.: +7 (495) 602-0070,
факс: +7 (499) 171-2250
Inf@cstroy.ru | www.cstroy.ru

ИНН 5042109739, КПП 504201001,
ОГРН 1095042005255
Юридический адрес АО «НИЦ «Строительство»:
141367, Московская область, г. Сергиев Посад,
пос. Загорские Дали, д. 6-11