

На правах рукописи



Зорин Дмитрий Васильевич

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

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский центр Строительство» – Научно-исследовательский проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсевича (АО «НИЦ Строительство» НИИОСП им. Н.М. Герсевича).

Научный руководитель: **Алексеев Андрей Григорьевич**,
доктор технических наук, доцент,
акционерное общество «Научно-исследовательский центр
«Строительство» (АО «НИЦ «Строительство»)),
заместитель генерального директора по научной работе

Официальные оппоненты: **Пронзин Яков Александрович**,
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тюменский индустриальный университет»
(ФГБОУ ВО «ТИУ»)), профессор кафедры строительного
производства и геотехники

Бояринцев Андрей Владимирович,
кандидат технических наук,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный архитектурно-
строительный университет» (ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»)),
доцент кафедры геотехники

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВО «ВГТУ»))

Защита состоится 25 декабря 2025 г. в 11:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 54.1.002.01, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, корп. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6 и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Смирнова Любовь Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

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, а также 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 условиях недостаточной развитости 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., Хрусталева 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., Полуэктов 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 вечномёрзлых грунтах» ВНИИОСП Госстроя СССР, «Рекомендации по устройству буронабивных свай в вечномёрзлых грунтах» Института мерзлотоведения СО РАН, «Инструкция по проектированию и устройству буронабивных свай-стоек в вечномёрзлых грунтах района Норильска» Минцветмета СССР. В них рассмотрены различные методы устройства буронабивных свай в многолетнемёрзлых грунтах, включая метод термоса, электро- и паропрогрева, использования химических добавок и комбинации этих методов. При этом в основном предполагается использование свай-стоек в многолетнемёрзлых грунтах по принципу II, с допущением оттаивания.

Настоящее исследование посвящено изучению взаимодействия буровых свай, изготовленных с применением химических добавок, с многолетнемёрзлым 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 многолетнемёрзлым грунтом. Свод правил СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах» 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 многолетнемёрзлых 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.

Цель работы: совершенствование методики определения несущей способности буровых свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах.

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 работы заключается в следующем:

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 заключается в следующем:

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 заключается в следующем:

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 методика исследований

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 в получение результатов работы заключается в следующем.

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:

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 исключаяющий 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 предопределена 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. Получен 1 патент на изобретение.

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.

Специальность, которой соответствует диссертация

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.1.2. «Основания и фундаменты, подземные сооружения» по пунктам 1, 5 и 15.

Работа выполнялась в Научно-исследовательском, проектно-изыскательском и конструкторско-технологическом институте оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсегонова (НИИОСП им. Н. М. Герсегонова) — 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. Герсегонова АО «НИЦ «Строительство» за помощь, оказанную при разработке диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования и приведена общая характеристика работы.

Глава 1 содержит результаты аналитического обзора литературы по вопросам тепло- и массообмена между бетонной смесью и многолетнемерзлым грунтом при устройстве буровых свай, а также методик расчета несущей способности и способов их устройства. Показано, что разработанные ранее решения не позволяют исключить засоление грунтов основания свай, поэтому задача определения несущей способности свай в искусственно засоленных многолетнемерзлых грунтах остается нерешенной.

В **Главе 2** представлены результаты разработки методологии экспериментальных исследований, приведены характеристики грунтов как объекта исследования, методики проведения испытаний, способы обработки и анализа результатов исследований.

Для сопоставления и обеспечения воспроизводимости результатов всего комплекса экспериментальных исследований принят единый состав бетонной смеси 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).

Предельно длительное значение сопротивления сдвигу мерзлого грунта по поверхности смерзания с бетоном свай R_{sh} , кПа, определялось путем проведения испытаний на одноплоскостной срез по стандартной методике. Для определения сопротивления сдвигу мерзлых грунтов, засоленных в результате устройства свай, разработан новый способ подготовки образцов, который дополнительно включал заполнение колец цементным раствором, изготовленным с применением химической добавки, при положительной температуре.

Для разработки способа устройства буровой свай, исключающего возможность засоления ее основания, проведены испытания грунтов, покрытых гидроизоляционным материалом. Подготовка образцов для проведения данных испытаний дополнительно включала нанесение на поверхность образца грунта жидкой резины.

Проведены лотковые испытания фрагментов свай в мерзлом грунте. В ходе устройства фрагментов свай измерялась температура бетонной смеси и грунта. Далее проводились испытания статической нагрузкой по стандартной методике до срыва. По результатам лотки разрезались, отбирались образцы грунта, и определялась их степень засоленности кондуктометрическим методом. Для этого первоначально устанавливалась зависимость электрической проводимости $1/X$, см/мкСм, от заданной концентрации водного раствора

с комплексной добавкой, C , % (Рисунок 1). Степень засоленности D_{sal} , %, определялась по стандартной методике от концентрации порового раствора грунта C_{ps} , д. ед.

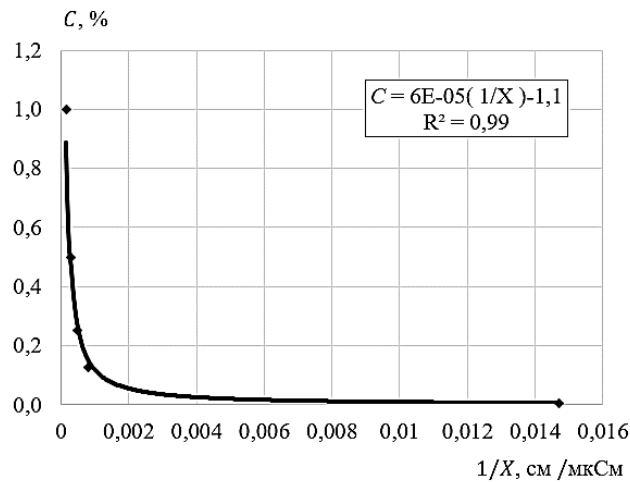


Рисунок 1 – Зависимость электрической проводимости водного раствора $1/X$, см/мкСм, от заданной концентрации водного раствора, C , %

На опытной площадке в городе Якутске проведены испытания четырех натуральных свай статической нагрузкой до срыва по стандартной методике. При изготовлении свай и проведении испытаний измерялась температура грунтов.

Глава 3 содержит результаты испытаний по определению сопротивления сдвигу искусственно засоленных мерзлых грунтов. Путем статистической обработки результатов испытаний получены зависимости сопротивления сдвигу искусственно засоленных глинистого и песчаного грунтов на $R_{sh,sal}$, кПа, от температуры T , °С, представленные на Рисунке 2.

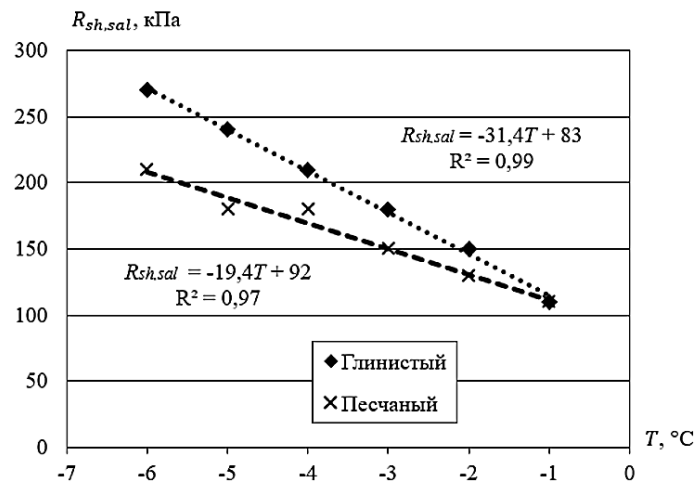


Рисунок 2 – Зависимости предельно-длительного сопротивления сдвигу $R_{sh,sal}$, кПа, мерзлого глинистого и песчаного грунтов от температуры T , °С

Сравнительный анализ результатов испытаний $R_{sh,exp}$, кПа, с нормативными значениями $R_{sh,calc}$, кПа, сопротивления мерзлого грунта сдвигу показал, что использование понижающего коэффициента γ_{sh} не позволяет достоверно определить величину искомого параметра. Опытные значения сопротивления мерзлого суглинка сдвигу на порядка 30 % превышают расчетные значения. Для песка опытное значение ниже расчетного на 15–35 %.

С использованием полученных зависимостей определены отношения расчетных величин сопротивления сдвигу грунтов, засоленных в результате устройства буровой сваи, к значениям для незасоленных грунтов. Отношение $R_{sh,sal}/R_{sh}$ для глинистого грунта составило 0,87, а для песчаного — 0,52. Путем регрессионного анализа получены зависимости сопротивления сдвигу от степени засоленности D_{sal} , %, и безразмерной температуры θ , равной $\theta = T/T^*$, где T — температура грунта, °C, а T^* — температура, равная минус 1 °C.

С помощью полученных отношений выполнена корректировка зависимостей для расчетного сопротивления искусственно засоленного грунта сдвигу $R_{sh,sal}$, кПа:

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

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

Определено, что степень засоленности образцов грунта, испытанных на одноплоскостной срез, составила 0,06 % для суглинка и 0,23–0,32 % для песка.

Представлены результаты статических испытаний фрагментов свай в песчаном грунте при температурах минус 0,6 °C и минус 2,7 °C. Результаты лотковых испытаний оказались ниже нормативных значений не более чем на 20 % и выше результатов испытаний на срез на 50 %. По результатам визуального осмотра разрезанных лотков установлено, что сдвиг происходит по поверхности грунт — грунт в непосредственной близости от свай, что является типичным для буронабивных свай, в том числе устраиваемых в талых (немерзлых) грунтах.

В Главе 4 представлены опытные данные по изменению температуры бетона и грунтов. Представлены опытные данные по изменению степени засоленности грунтов вокруг свай. Отмечено, что степень засоленности грунта снижается по мере удаления от свай. С учетом этого разработана схема расчета несущей способности свай, представленная на Рисунке 3.

Зона «А» — (расчетная) изменяемая область толщиной не более 20 мм 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 практически не происходит изменений параметров.

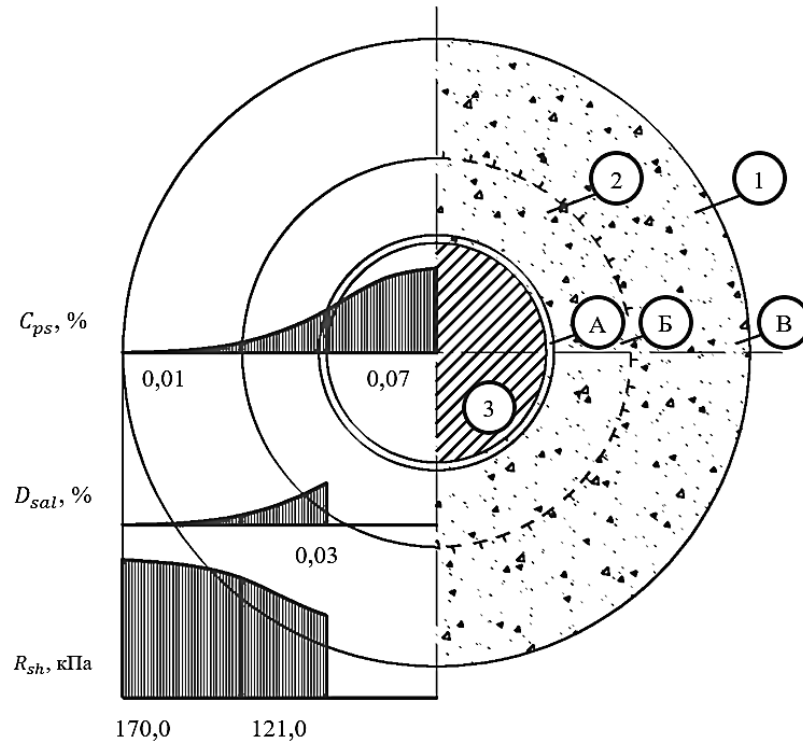


Рисунок 3 – Зависимость концентрации порового раствора C_{ps} , д. ед., степени засоленности D_{sal} , %, и сопротивления сдвигу R_{sh} , кПа, от расстояния до центра буровой сваи: 1 — многолетнемерзлый грунт, не оттаивающий в процессе устройства сваи; 2 — грунт, оттаивающий в процессе устройства сваи;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

Далее приведены результаты численного моделирования теплового взаимодействия буровых свай различных диаметров с многолетнемерзлым грунтом. В расчетно-теоретическом исследовании учтено тепловыделение бетонной смеси при твердении. Условия теплообмена принимались по известной зависимости суммарного тепловыделения для бетона В25 от времени.

Путем регрессионного анализа результатов расчетов получена многофакторная зависимость времени замерзания грунтов t , сут, от их безразмерной начальной температуры θ и теплофизических свойств λ_{th}/λ_f для различных диаметров свай d , мм, представленная на Рисунке 4:

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

Полученное уравнение предложено использовать как методику предварительной оценки времени замерзания оснований, оттаявших в процессе устройства буровых свай.

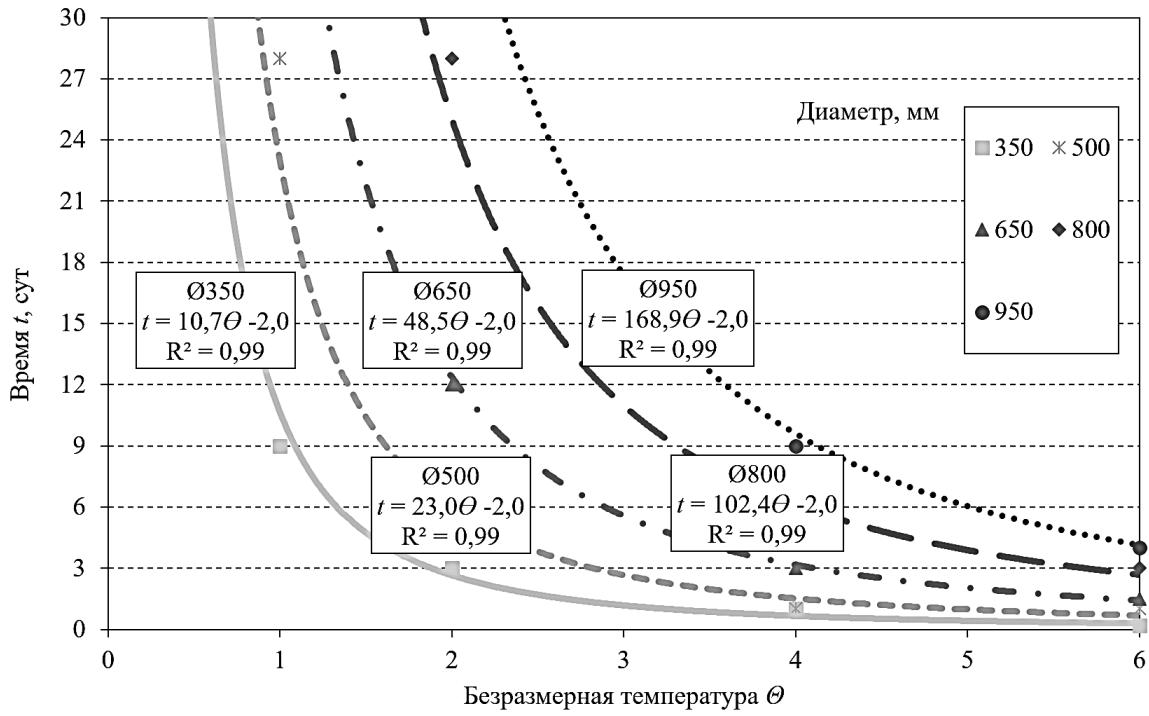


Рисунок 4 – Зависимость времени замораживания грунтов t , сут, от их безразмерной начальной температуры θ для различных диаметров свай d , мм

Представлены результаты расчетов степени засоленности грунтов основания свай с использованием методики оценки времени и известной модели взаимодействия бетона свай с окружающим многолетнемерзлым грунтом, разработанной Курушиным А.Д.:

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

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

x — расстояние от центра свай, м;

α — параметр, м/сут^{1/2}, определяемый по формуле:

$$\alpha = \sqrt{k_{o,д.}/n_{эф}}, \quad (5)$$

где $k_{o,д.}$ — коэффициент осмотической диффузии ионов солей в грунте, м²/сут;

$n_{эф}$ — эффективная пористость, определяемая как отношение объема жидкой фазы воды к общему объему грунта, д. ед.

По результатам расчета получены графики зависимости концентрации порового раствора грунта $C_{ps}/C_{ps,0}$ от расстояния x , м, до свай на различные моменты времени после устройства (Рисунок 5).

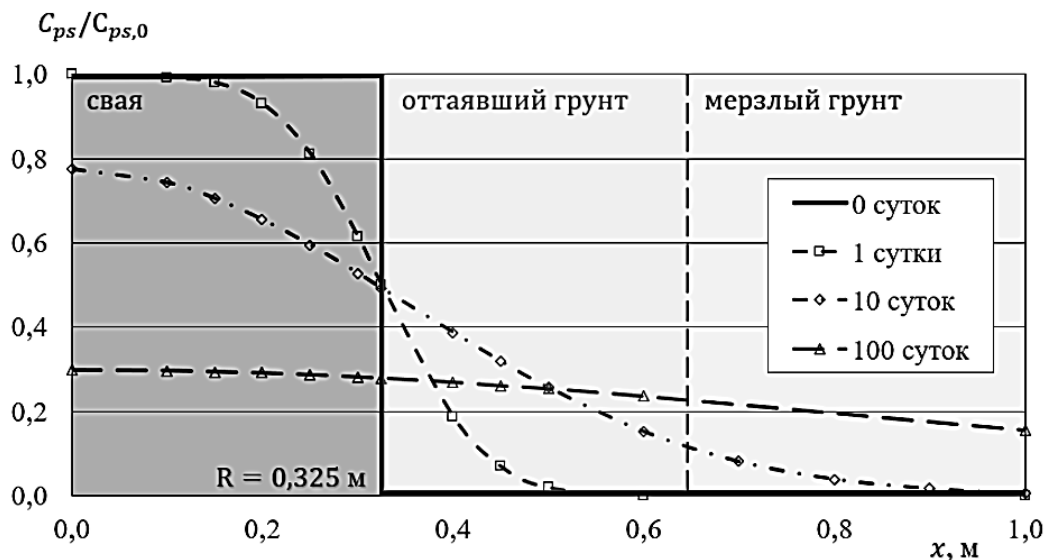


Рисунок 5 – Зависимость концентрации порового раствора грунта $C_{ps}/C_{ps,0}$ от расстояния x , м, до сваи на различные моменты времени после устройства

По концентрации порового раствора определены величины степени засоленности грунтов основания, оттаявших после устройства свай, при различном времени их замерзания.

Глава 5 содержит усовершенствованную методику определения несущей способности одиночной буровой сваи в искусственно засоленном многолетнемерзлом грунте, используемом по принципу I.

В соответствии с методикой, расчетное предельно длительное сопротивление i -го слоя многолетнемерзлого искусственно засоленного грунта сдвигу $R_{sh,sal,i}$, кПа, определяется по результатам проведения испытаний грунта с заданной концентрацией порового раствора, определенной по (4), или по формуле:

$$R_{sh,sal} = \frac{R_{sh,n} \gamma_{sh,sal}}{\gamma_g}, \quad (6)$$

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

γ_g — коэффициент надежности по грунту;

$\gamma_{sh,sal}$ — коэффициент условий работы буровой сваи в искусственно засоленном многолетнемерзлом грунте, равный отношению $R_{sh,sal}/R_{sh}$.

Для принятого состава бетонной смеси с комплексной химической добавкой определено множество значений коэффициента $\gamma_{sh,sal}$ (Таблица 1).

Таблица 1 – Коэффициенты условий работы для буровых свай

$T, ^\circ\text{C}$	$\frac{\lambda_{th}}{\lambda_f}$	Коэффициент условий работы $\gamma_{sh, sal}$ при диаметре свай $d, \text{ м}$									
		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

В виде зависимостей осадки свай S , мм, от нагрузки P , кН, и времени t , ч, по ступеням нагружения представлены результаты статических испытаний натурных буронабивных свай (Рисунок 6).

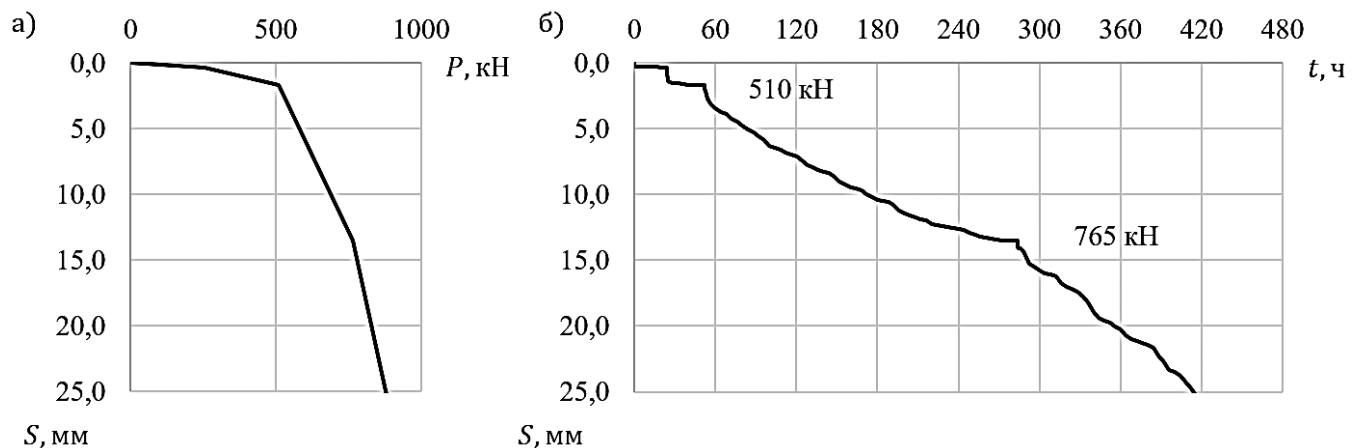


Рисунок 6 – Результаты испытаний свай Ø500 мм длиной 5 м: а) зависимость осадки свай S , мм, от нагрузки P , кН; б) зависимость осадки свай S , мм, от времени t , ч, по ступеням нагружения

С использованием результатов статических испытаний выполнена апробация усовершенствованной методики, результаты которой представлены в Таблицах 2 и 3. Получено, что несущая способность свай и фрагментов, определенная расчетом по усовершенствованной методике, отличается от опытных данных не более чем на 16 %.

Таблица 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

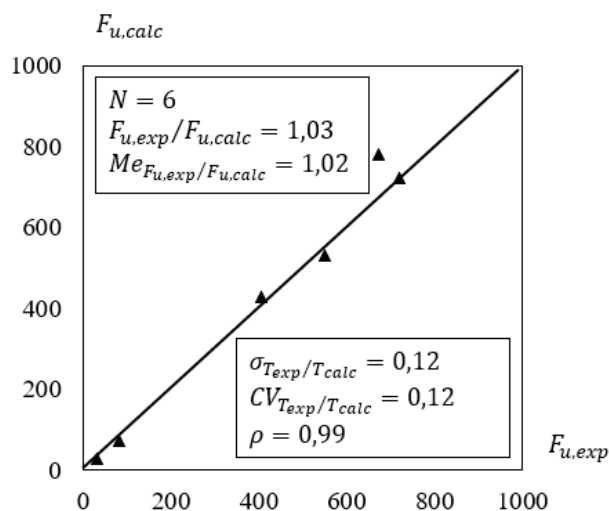
(%) — процентное отношение расчетного значения несущей способности к значению, полученному по результатам статического испытания, без учета собственного веса.

Таблица 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 к значению, полученному по результатам статического испытания, без учета собственного веса.

Результаты апробации показали, что достоверность расчета по усовершенствованной методике увеличивается на 40 % (Рисунок 7).

Рисунок 7 – Отношение опытного $F_{u,exp}$ и расчетного $F_{u,calc}$ значений несущей способности сваи (фрагмента), кН

Представлен разработанный способ устройства буровой сваи в многолетнемерзлом грунте, исключающий массообмен между раствором и грунтом путем нанесения гидроизоляционного материала — например, жидкой резины. Показано, что при использовании способа предельно длительное сопротивление сдвигу увеличивается в 1,2–1,3 раза по сравнению с искусственно засоленными образцами.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По результатам работы сделаны следующие основные выводы.

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.

Сформулированы 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 бетонной смеси 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 бетонной смеси с комплексной химической добавкой. 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. 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 свай, 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 исключающий 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.

Патенты

1. Патент № 2803751 С1 Российская Федерация, МПК E02D 5/34. Способ устройства буронабивной сваи 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».

Публикации в периодических и других изданиях

1. Алексеев А. Г., Сазонов П. М., Зорин Д. В. К вопросу усовершенствования технологии устройства и расчета различных видов свай / А. Г. Алексеев, П. М. Сазонов, Д. В. Зорин // Вестник НИЦ Строительство. — 2019. — № 1 (20). — С. 5–13. — EDN YVTTYJ.
2. 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.

Публикации в сборниках трудов конференций

1. Alekseev, A., Zorin, D. Interaction of the augercast micropiles with permafrost // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 365, № 4. – С. 042056.
2. Alekseev, A. et al. Application of pile foundations in structurally unstable soils // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Т. 265. – С. 05020.