

На правах рукописи



Жайсамбаев Еркин Аскерович

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

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

Краев Алексей Николаевич

Официальные оппоненты:

Парамонов Владимир Николаевич

доктор технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», заведующий кафедрой «Основания и фундаменты»

Артюшенко Игорь Александрович

кандидат технических наук, доцент

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», заведующий кафедрой «Проектирование и строительство железных дорог»

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

Защита состоится 28 мая 2026 г. в 12:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.419.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте <http://www.tyuiu.ru>.

Автореферат разослан 22 апреля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Степанов Максим Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

В сложившейся ситуации **актуальной задачей** является исследование изменения температурного режима и его влияния на напряженно-деформированное состояние (далее – НДС) оттаявшего многолетнемерзлого основания с погруженной в него одиночной железобетонной сваей (далее – свая) при термостабилизации околосвайного грунта вертикальными СОУ для корректной оценки несущей способности и осадки сваи в процессе ее статического нагружения.

Степень разработанности темы исследования. Научные труды Ю.А. Александрова, Н.А. Бучко, Ю.Я. Велли, А.С. Герасимова, М.Н. Гольдштейна, М.Д. Головки, С.Е. Гречищева, И.Е. Гурьянова, В.В. Докучаева, М.М. Дубины, В.Ф. Жукова, А.А. Кислицына, В.С. Колунина, В.Г. Кондратьева, Я.А. Кроника, Н.Б. Кутвицкой, В.П. Мельникова, В.Г. Меламеда, Ю.С. Миренбурга, М.А. Минкина, Н.Г. Мусакаева, В.О. Орлова, Л.С. Поденко, Г.П. Пустовойта, Д.В. Редозубова, Л.Т. Роман, М.И. Сумгина, Р.В. Чжана, Н.Ф. Федорова, Ю.Г. Федосеева, В.Н. Феклистова, Г.М. Фельдмана, Д.М. Шестернева, Э.Р. Эккерта,

А.Л. Ястребова, S. Tabera, S.F. Thompsona, G.H. Watsona и других посвящены исследованиям мерзлых грунтов и прогнозу динамики их состояния.

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

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

Вопросы взаимодействия инженерного сооружения с мерзлыми грунтами рассмотрены в работах И.А. Артюшенко, Е.С. Ашпиза, А.В. Брушкова, Я.Б. Горелика, П.И. Дыдышко, И.И. Железняк, Э.В. Ибрагимова, В.А. Ильичева, А.А. Коновалова, С.А. Кудрявцева, А.Л. Лязгина, Н.С. Никифоровой, Л.Н. Нуждина, А.В. Павлова, В.Н. Парамонова, В.В. Пассека, В.Г. Порхаева, Я.А. Пронозина, В.В. Ремизова, И.И. Сахарова, Л.Н. Хрусталева, А.А. Цернанта, Н.А. Цытовича, Т.В. Шепитько, G.H. Johnstona и других.

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

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

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

Задачи исследования:

- проанализировать опыт строительства, эксплуатации и реконструкции объектов промышленного и гражданского назначения в криолитозоне с пониженным залеганием кровли ММГ;
- провести экспериментальные исследования для установления закономерностей изменения температурного режима, влияющего на НДС оттаявшего многолетнемерзлого основания с погруженной в него сваей, при термостабилизации СОУ и действии вертикальных статических вдавливающих и выдергивающих нагрузок;

- установить на основе экспериментальных исследований геометрические параметры формирующегося мерзлого грунтового ядра вокруг сваи и оценить динамику его развития в зависимости от конструктивных параметров СОУ, а также характеристик грунтов основания;
- выявить на основе натуральных экспериментальных исследований изменение несущей способности и осадки сваи, погруженной в оттаявшее многолетнемерзлое основание, при термостабилизации СОУ;
- разработать методику определения осадки сваи в термостабилизируемом основании, представленном оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами, с учетом экспериментально выявленных геометрических параметров мерзлого грунтового ядра, формирующегося вокруг сваи.

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

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

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

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

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

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

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

Положения, выносимые на защиту:

– обоснование схем термостабилизации оттаявшего основания с пониженной кровлей ММГ для увеличения несущей способности погруженной в него сваи;

– результаты экспериментальных исследований по установлению закономерностей изменения температурного режима, влияющего на НДС термостабилизируемого основания с погруженной в него сваей при приложении к ней статических вдавливающих и выдергивающих нагрузок;

– результаты экспериментальных исследований по установлению геометрических параметров мерзлого грунтового ядра, формируемого вокруг сваи в зависимости от характеристик СОУ и грунтов основания;

– результаты экспериментальных исследований изменения несущей способности и осадки сваи, погруженной в оттаявшее многолетнемерзлое основание, при термостабилизации СОУ;

– разработанная методика определения осадки сваи в термостабилизируемом основании, представленном оттаявшими ММГ несливающегося типа, с учетом экспериментально

выявленных закономерностей изменения температурного режима и геометрических параметров мерзлого грунтового ядра, формирующегося вокруг сваи.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

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

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

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

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

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и представлено общее описание диссертационного исследования.

В первой главе проведен обзор отечественной и зарубежной литературы, отражающей свойства ММГ как оснований промышленных и гражданских объектов, принципы и технологии строительства в криолитозоне. Проанализированы основные методы строительства на мерзлых, таломерзлых, оттаивающих, оттаявших, охлажденных и морозных основаниях, а также способы регулирования температурного режима основания. Согласно нормативной документации, строительство в криолитозоне возможно по следующим принципам: I принцип – основание сохраняют в мерзлом состоянии в период строительства и эксплуатации объекта; II принцип – основание используют в оттаянном или оттаивающем состоянии. Принцип проектирования оснований сооружений, методы и средства обеспечения температурного режима назначают исходя из экономической целесообразности проектных решений. В большинстве случаев основание проектируют по I принципу, так как мерзлый грунт обладает значительной несущей способностью. Согласно анализу научных работ, охлаждение грунтов основания с -0.3 до -1.0 °C приводит к существенному, более чем двукратному, повышению несущей способности свайных фундаментов. Это связано с тем, что температурный фактор оказывает более значительное влияние на прочность ММГ, чем их литологический состав. Экспериментальные исследования и результаты проведенного мониторинга состояния промышленных и гражданских объектов в криолитозоне (С.С. Вялова, А.В. Брушкова, И.И. Железняк, В.А. Ильичева, Я.А. Кроника, А.Л. Лязгина, В.И. Макарова, В.П. Мельникова, М.А. Минкина, В.В. Ремизова, Л.Н. Хрусталева и др.) указывают на многочисленные случаи потери устойчивости грунтовых оснований с развитием деформаций фундаментов и вышележащих конструкций, то есть проблемы эффективного использования механических свойств мерзлых и оттаявших грунтов в качестве оснований инженерных объектов не решены в полной мере. При возведении объектов на ММГ по I принципу встречаются площадки, представленные наличием оттаявших толщ многолетнемерзлых грунтов с пониженным залеганием кровли мерзлоты, которые образованы под влиянием природных условий (меняющегося литологического состава и свойств грунтов, особенностей рельефа участка, заболоченности и т.д.) и в результате техногенных воздействий (обводненности участка, систематических сбросов и утечек инженерных сетей, стока и застоя поверхностных дождевых вод и т.д.). На основании проведенного обзора литературы были сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе приведены качественные результаты лабораторных экспериментов по изучению характера и особенностей работы модели сваи в процессе ее статического нагружения в термостабилизируемом основании, представленном тальми суглинками, в открытой системе (с подтоком воды). Эксперименты проведены с учетом геометрического масштаба (M_G) равного 1:10 и временного масштаба (M_B) равного 1:100. При проведении экспериментов моделировали теплый и холодный периоды года согласно принятому масштабу времени. Для определения динамики увеличения несущей способности сваи эксперименты разделены на два этапа:

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

Для проведения исследований был разработан универсальный экспериментальный стенд (рис. 1) в виде лотка, имеющего внутренние размеры $1 \times 1 \times 1,1(h)$ м, с жесткими стенками и дном.

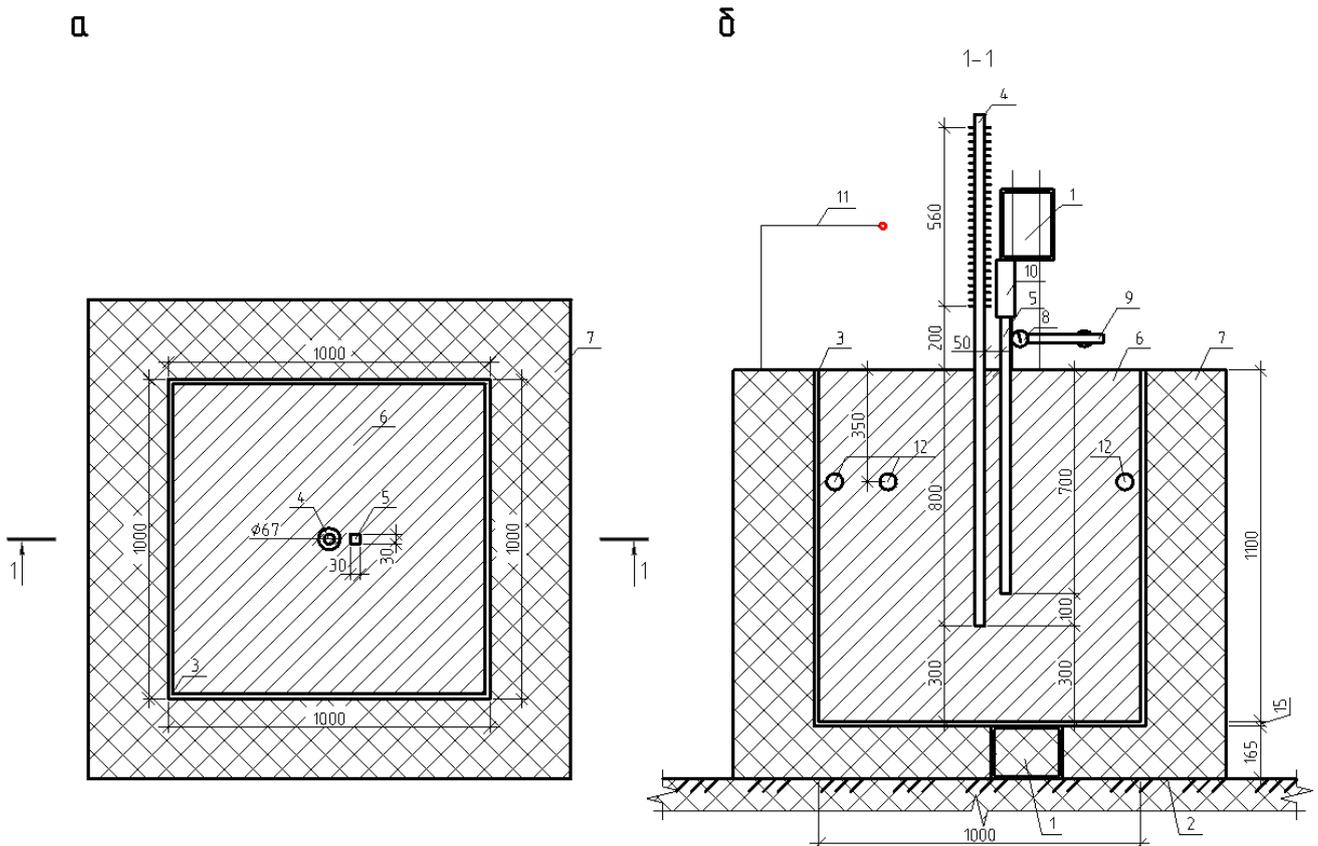


Рисунок 1 – Экспериментальный стенд (а – в плане; б – в разрезе): 1 – система для нагружения сваи; 2 – утепленный пол климатической камеры; 3 – корпус стенда; 4 – СОУ (отключен на первом этапе); 5 – ЖБ свая; 6 – суглинок; 7 – теплоизоляция; 8 – индикаторы ИЧ-50; 9 – реперная система; 10 – домкрат; 11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

В стенд послойно по 100 мм укладывали суглинок нарушенной структуры, имеющий плотность сухого грунта $\rho_d = 1505\text{--}1552 \text{ кг/м}^3$ и влажность $W = 32\text{--}34 \%$, теплофизические характеристики которого представлены в таблице 1.

Таблица 1. Теплофизические характеристики суглинка

$\lambda_f, \text{Вт/(м}\cdot\text{°C)}$	$\lambda_{th}, \text{Вт/(м}\cdot\text{°C)}$	$C_f, \text{кДж/(м}^3\cdot\text{°C)}$	$C_{th}, \text{кДж/(м}^3\cdot\text{°C)}$	$L_v, \text{МДж/м}^3$	$T_{bf}, (\text{°C})$
1,80	1,59	2805,58	3332,68	84,83	-0,2

В грунтовое основание погружали модель СОУ и сваи. В качестве модели СОУ использовали термостабилизатор производства НПО «Фундаментстройаркос»: длина испарителя 0,8 м; длина конденсатора 0,56 м. Свая квадратного сечения 3×3 см общей длиной 80 см, материал – железобетон. Параллельно с послойным заполнением стенда грунтовой пастой производили установку грунтовых марок, месдоз, термопар и датчиков влажности (рис. 2). Уровень грунтовых вод (открытая система) моделировали системой из перфорированных полипропиленовых труб, размещенных на глубине 0,35 м от дневной поверхности моделируемого основания. Трубы заполняли водой, уровень которой поддерживали постоянным на протяжении всего эксперимента. Фотографии подготовительных работ при сборке экспериментального стенда представлены на рисунке 2.

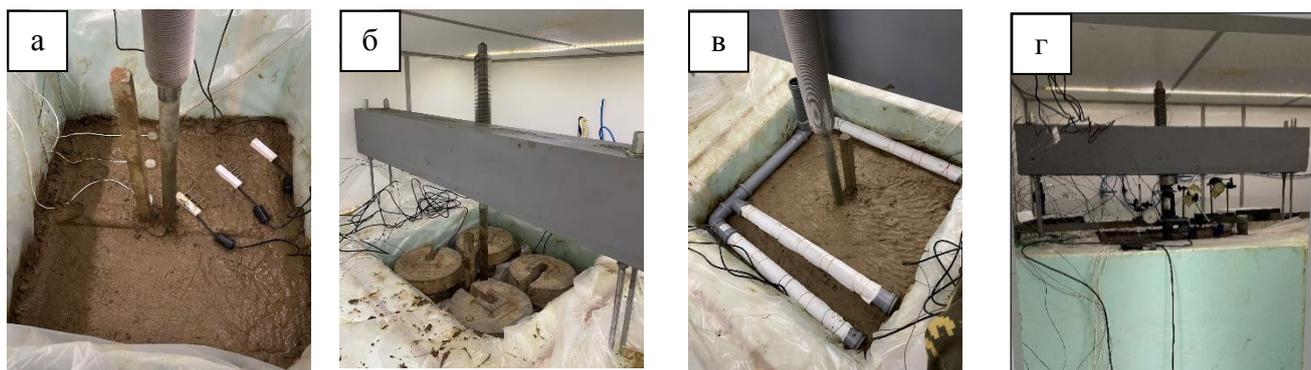


Рисунок 2 – Подготовительные работы:

а – заполнение лотка грунтом с размещением месдоз и датчиков влажности; б – уплотнение грунтового основания; в – моделирование уровня грунтовых вод; г – общий вид стенда

На первом этапе моделировали талое основание в открытой системе с температурой грунта $T = 0,4\text{--}0,6 \text{ °C}$. Испытание талого суглинка свай производили согласно ГОСТ 5686-2020. При проведении статических испытаний временной и геометрические параметры масштабировали согласно ранее принятым значениям. В результате проведения первого этапа получен график зависимости осадки сваи от нагрузки в талых суглинках (рис. 3).

После завершения первого этапа был осуществлен переход от стационарного температурного режима к нестационарному с установлением в климатической камере средней температуры воздуха г. Лабитнанги по данным многолетних наблюдений (таблица 2) с учетом глобального потепления климата за период отрицательных и положительных температур.

Таблица 2. Среднемесячная температура воздуха

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Температура воздуха, °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

Согласно принятому масштабу времени, продолжительность холодного периода равна 54,48 ч при температуре $T_{f,m} = -13,8\text{ °C}$, а теплого периода – 33,12 ч при температуре $T_{th,m} = +10,1\text{ °C}$. В конце летних периодов производили испытания термостабилизируемых суглинков сваей согласно ГОСТ 5686-2020. В результате проведения второго этапа исследований получены графики зависимости осадки сваи от нагрузки (рис. 3) в конце первого – четвертого летних периодов (сентябрь – октябрь).

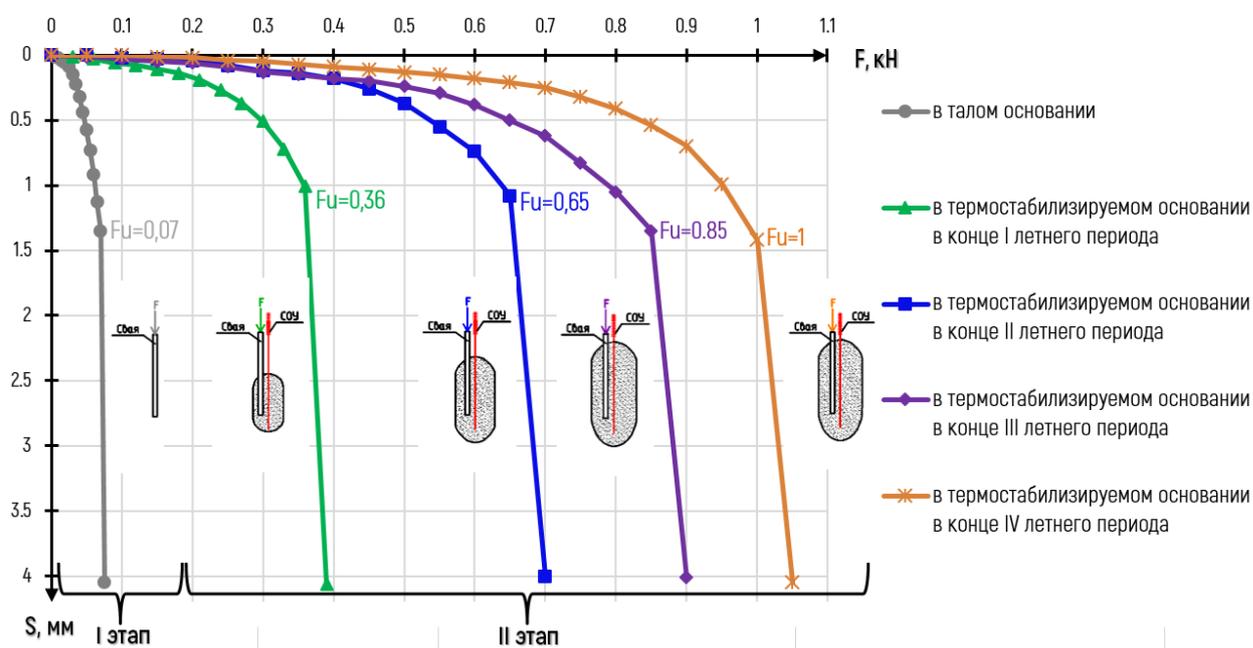


Рисунок 3 – График зависимости осадки сваи S от нагрузки F

Обработанные результаты статических испытаний суглинка сваей (рис. 3) на разных этапах и в разные периоды эксперимента представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты статических испытаний

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

Термостабилизация талого грунтового основания позволила увеличить несущую способность сваи с 0,07 до 0,59 кН за счет формирования мерзлого грунтового ядра вокруг сваи (рис. 4), работающего совместно с ней (по данным перемещений сваи и грунтовых марок, расположенных в ядре и за его пределами) и увеличивающего ее боковую и лобовую поверхности. Максимальный прирост (203,9 %) несущей способности сваи произошел в конце первого летнего периода. Начиная с четвертого летнего периода прирост несущей способности сваи составил не более 20 %, что свидетельствует о формировании условного температурного равновесия в грунтовом основании.

На рисунке 4 представлены температуры грунта вблизи боковой поверхности сваи и граница мерзлого ядра, установленная по температуре начала замерзания. Согласно анализу температурных графиков (рис. 4), средняя температура грунта вдоль боковой поверхности сваи в области смерзания в конце первого, второго, третьего и четвертого летних периодов равна -0,33; -0,47; -0,6; -0,85 °С соответственно. Результатом главы является качественное подтверждение эффективности термостабилизации талого основания для снижения осадки и увеличения несущей способности сваи. Результаты лабораторных исследований легли в основу проведения численного и натурного экспериментов.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования температурного режима и предложена аналитическая методика определения осадки сваи с мерзлым грунтовым ядром. Для установления основных геометрических параметров ядра, формирующегося вокруг сваи, проведена серия численных экспериментов в программе Frost 3D. По климатическим условиям г. Лабытнанги произведен температурный расчет массива оттаявшего многолетнемерзлого основания с кровлей мерзлых грунтов, залегающей на глубине 25 метров. В оттаявшее основание погружена на 11 м железобетонная свая марки С 120.30–10у с конструкцией СОУ общей длиной 14 м (испарительная часть – 12 м, конденсаторная – 2 м). Работу СОУ моделировали с учетом его конструктивных параметров. Размеры расчетной области равны 50 × 50 × 50 м. По нижней и боковым граням расчетной области задан поток тепла, равный нулю. Теплофизические характеристики грунтов приняты согласно

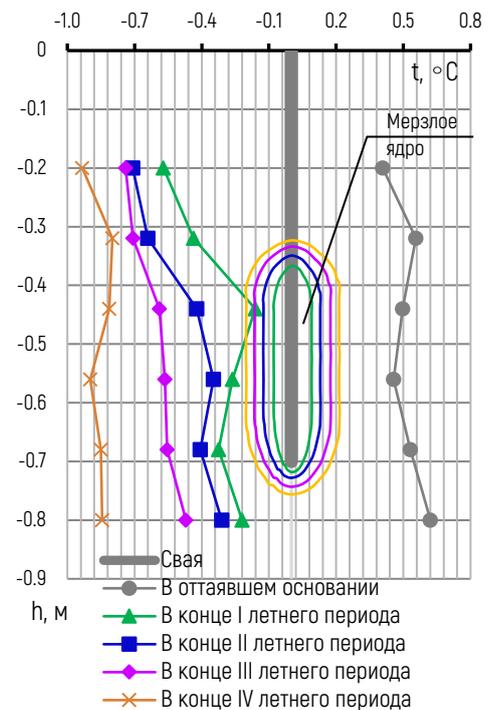


Рисунок 4 – График распределения температуры грунта у боковой поверхности сваи на разных этапах с контуром формируемого мерзлого грунтового ядра

приложению Б СП 25.13330.2020. По результатам расчетов построены графические зависимости изменения диаметра d (рис. 5а), высоты h (рис. 5б) и геометрического положения подошвы $A = H - L$ (рис. 5в) ядра от начальной температуры $T_{нач}$ и типа грунтов основания. Графические зависимости изменения геометрических параметров ядра, формируемого вокруг свай общей длиной 10, 11 м с конструкцией СОУ общей длиной 12, 13 м соответственно, погруженных в оттаявшее основание, представлены в диссертации. Схема свай с ядром, полученная по результатам экспериментов, изображена на рисунке 6. Для разработки методики определения осадки свай в грунтовом основании принято допущение, что ядро у поверхности свай имеет близкую к цилиндру форму. Осадка свай от действия внешней нагрузки $S = f(F)$ определена исходя из известного допущения о раздельной работе пяты и боковой поверхности свай в грунтовом основании. График зависимости осадки свай от нагрузки разделен на два участка (рис. 7): первый участок, на котором зависимость деформаций от напряжений линейная; второй участок, соответствующий нелинейной зависимости между этими величинами. Осадка свай от действия внешней нагрузки равна осадке S_1 на первом участке и осадке S_2 на втором участке. На первом участке (до нагрузки $\leq F_1$) нагрузка распределена между пятой и боковой поверхностью, на втором участке (при нагрузке $> F_1$) полностью проявляется работа пяты свай.

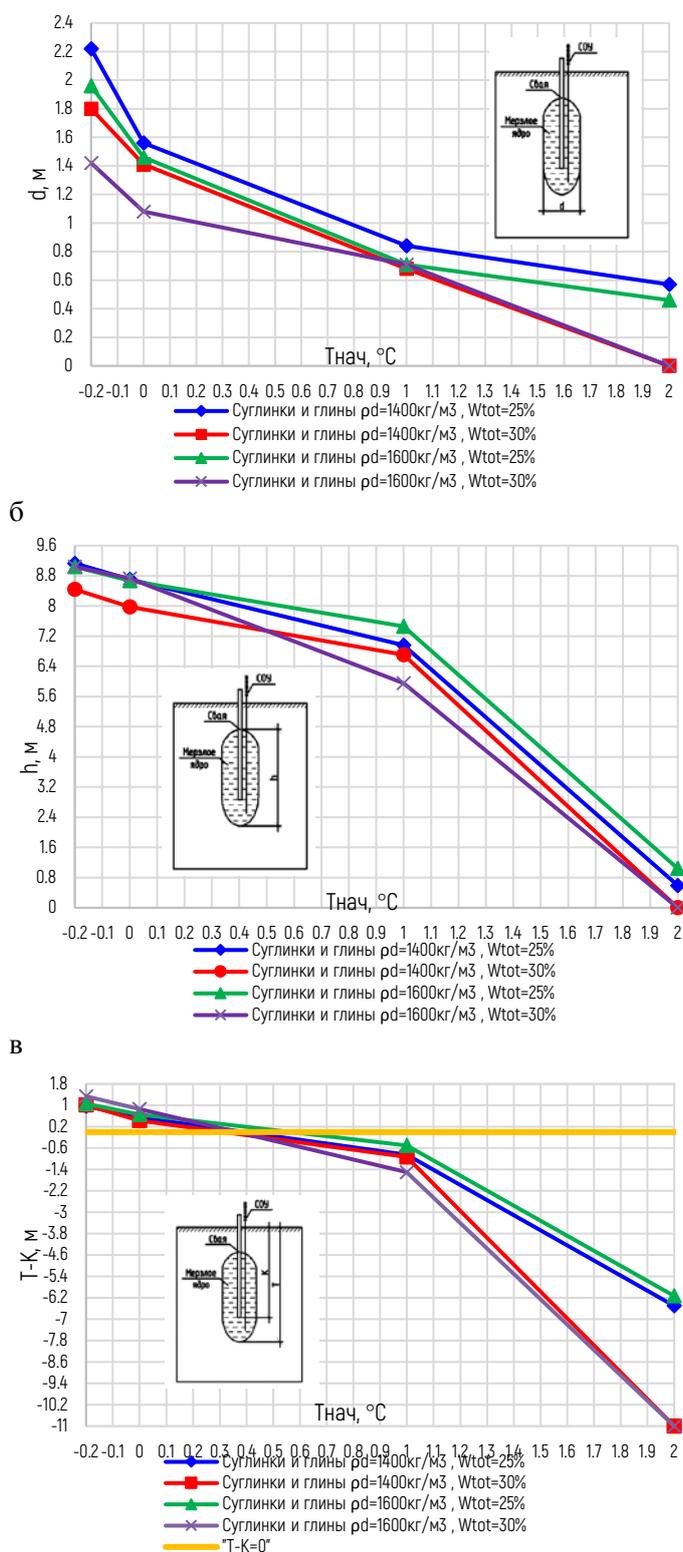


Рисунок 5 – Зависимость изменения: диаметра d (а); высоты h (б) и геометрического положения подошвы ядра относительно пяты свай $A = H - L$ (в) от начальной температуры $T_{нач}$ грунтов

Осадка сваи на первом участке определена по методу В.З. Власова, основанному на принципе возможных перемещений Лагранжа и примененному к упругому основанию, согласно которому сумма работ всех внешних и внутренних сил на возможных перемещениях, вызываемых этими силами, равна нулю:

$$\Sigma \delta A_k^e = \Sigma \delta A_k^i. \quad (1)$$

В методике рассмотрено упругое основание в виде прямоугольной области толщиной $\delta = 1$ м с погруженной в него свайей с мерзлым ядром и нагруженной нагрузкой F , (МН) (рис. 6а). Внешняя нагрузка разложена по принципу симметрии на две $F/2$ (рис. 6б). Нагрузку $F/2$ распределили между боковой F_b и лобовой F_l поверхностями:

$$\frac{F}{2} = \frac{1}{2}(F_b + F_l). \quad (2)$$

Касательные напряжения, распределенные по боковой поверхности сваи равномерно $\tau_1^b = -\tau_0/2$ (рис. 6б), либо по линейному закону: $\tau_2^b = -\tau_0 \cdot z/h_{св}$ (рис. 6б), определяют взаимодействие сваи с грунтовым основанием. Трение грунта по боковой поверхности сваи выше мерзлого ядра не учитывается, так как эта зона находится в деятельном слое и вклад ее в несущую способность составляет менее 5 %.

Для определения НДС основания рассмотрены только вертикальные перемещения частиц грунта, так как горизонтальные перемещения практически на порядок меньше вертикальных при центральном загрузении сваи. Перемещения представлены в виде произведения двух функций $w(x, z) = W(x) \cdot \psi(z)$. Безразмерная нормированная функция $\psi(z)$ задана, ее общий вид изображен на рисунке 8а, в частности $\psi(z)$ можно принять как линейную

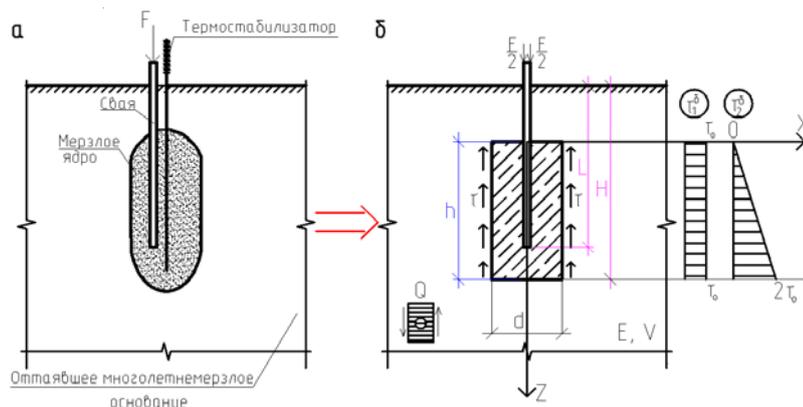


Рисунок 6 – Схема сваи с ядром (а – конструктивная; б – расчетная): h – высота ядра; d – диаметр ядра; L – глубина погружения сваи; H – расстояние от дневной поверхности грунта до подошвы ядра

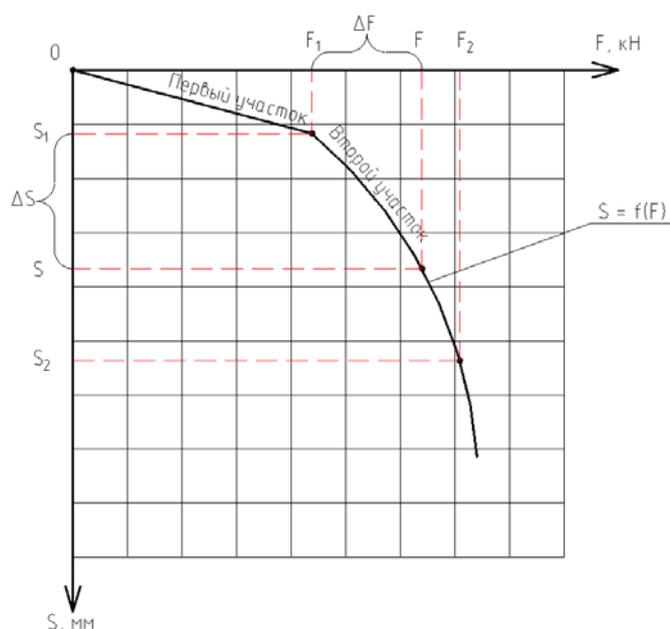


Рисунок 7 – График зависимости осадки сваи S от нагрузки F

функцию $\psi(z) = \frac{H-z}{H}$, искомой величиной является $W(x)$, м. Система уравнений задачи сведена к дифференциальному уравнению второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$2t \cdot W''(x) - k \cdot W(x) + q(x) = 0, \quad (3)$$

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

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

Получено общее решение уравнения (3):

$$W(x) = C \cdot e^{-\alpha x}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{k}{2t}}, \quad \left[\frac{1}{\text{М}} \right]. \quad (4)$$

К пяте сваи приложена сила $F_{\text{л}}$ (рис. 8а), от действия которой получено решение для нормальных напряжений $\sigma_{\text{л}} = -F_{\text{л}}/A_{\text{усл}}$, приложенных к площади условного фундамента $A_{\text{усл}} = \pi r^2$ (рис. 8б, r – радиус цилиндра).

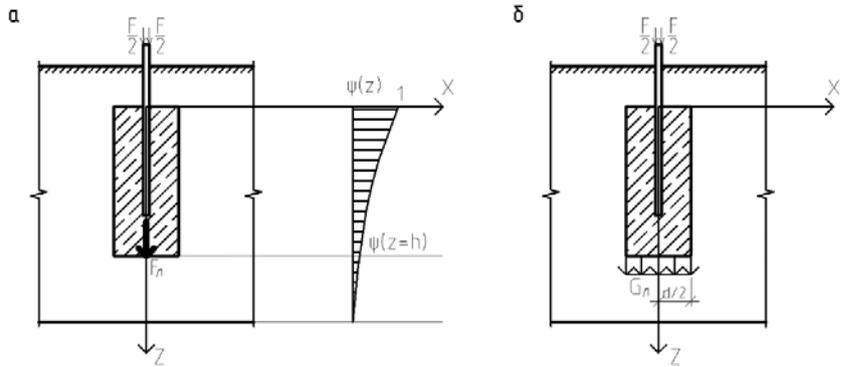


Рисунок 8 – Лобовое сопротивление на пяте сваи: а – в виде сосредоточенной силы; б – в виде нормальных напряжений

Для определения постоянной в общем решении (4) запишем граничное условие на пяте сваи:

$$\Sigma \delta A_k^e | (x = 0; z = h_{\text{св}}) = \Sigma \delta A_k^i | (x = 0; z = h_{\text{св}}). \quad (5)$$

Осадка сваи при равномерном распределении касательных напряжений по боковой поверхности и равномерно распределенной нагрузке по пяте вычисляется по формуле:

$$S_1 = -\frac{1}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\tau_0 \cdot a_{11} + \frac{F_{\text{л}}}{2} \cdot \psi(z = h_{\text{св}}) \right] \cdot \psi(0), \quad (6)$$

$$\text{где } \alpha = \sqrt{\frac{k}{2t}}, \quad \left[\frac{1}{\text{М}} \right];$$

$$a_{11} = \frac{1}{2} \int_0^{h_{\text{св}}} \psi(z) dz, \quad [\text{М}^3].$$

Коэффициент β определяет вклад боковой поверхности и пяты в общую несущую способность сваи: $F_6 = \beta \cdot F_{\text{л}}$, $\beta > 0$.

Окончательная формула для определения осадки сваи на первом участке имеет вид:

$$S_1 = -\frac{F}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\frac{\beta}{(\beta + 1) \cdot A_{\text{св}}} \cdot a_{11} + \frac{1}{2 \cdot (\beta + 1)} \cdot \psi(z = h_{\text{св}}) \right] \cdot \psi(0). \quad (7)$$

Осадку сваи на втором участке вычислим по методике, разработанной М.В. Малышевым и Н.С. Никитиной для определения осадки фундаментов в нелинейной стадии деформирования

грунта. Формула для определения осадки представляет собой дробно-линейную зависимость между осадкой и нагрузкой. Осадка S_2 в интервале изменения давлений в неупругой стадии работы грунта $F_1 \leq F \leq F_2$ рассчитывается по формуле:

$$S_2 = S_1 \frac{F(F_2 - F_1) - (F - F_1)F_1}{F_1(F_2 - F)}, \quad (8)$$

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

F – приращение нагрузки на сваю после достижения точки, где зависимость между напряжениями и деформациями перестает быть линейной;

F_1 – нагрузка, которую воспринимает пята сваи на этапе завершения линейной зависимости между напряжениями и деформациями.

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

$$S = S_1 + S_2. \quad (9)$$

Таким образом, в третьей главе определены форма и геометрические характеристики мерзлого ядра, а также разработан аналитический метод расчета осадки сваи с ядром в термостабилизированном основании из оттаявших ММГ. Для проверки предложенной методики проведены натурные исследования с последующим сопоставлением полученных экспериментальных данных с теоретическими результатами (рис. 14, 15).

В четвертой главе представлены результаты натурных исследований, проведенных на экспериментальной площадке карбонового полигона «Семь Лиственниц» Научного центра изучения Арктики в г. Лабитнанги. На площадке были погружены четыре испытуемые железобетонные сваи марки С 120.30-10у на глубину 11 м (рис. 9): сваи № 1, 2 для испытания



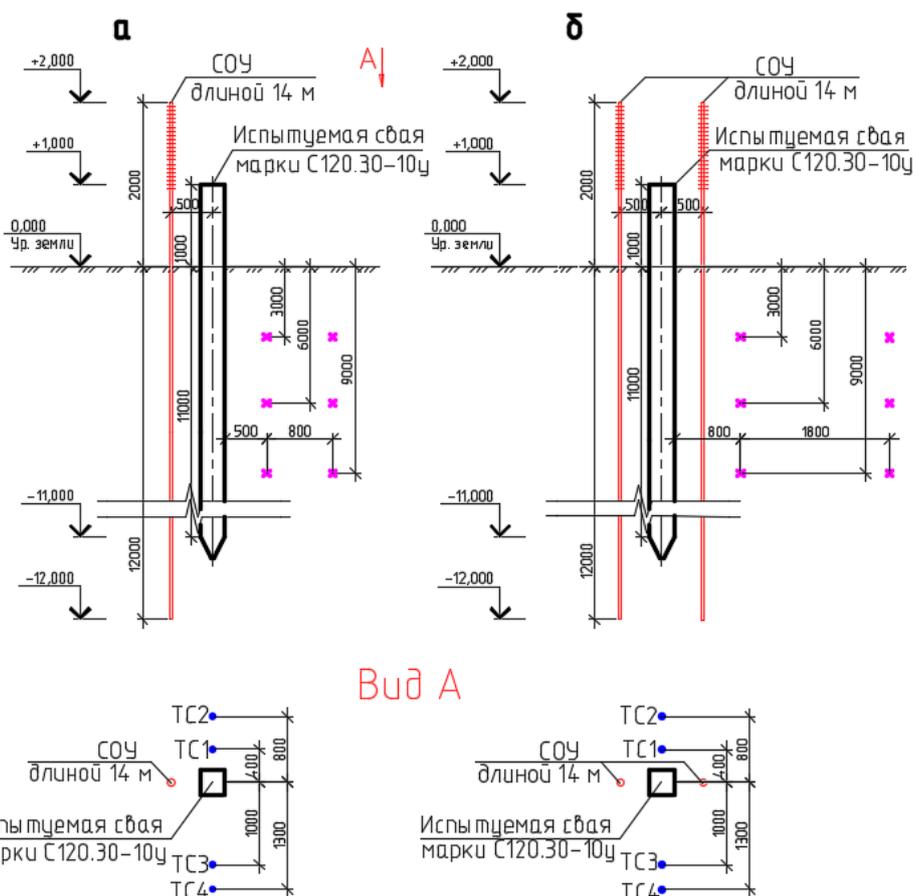
вдавливающими нагрузками и сваи № 3, 4 для испытания выдергивающими нагрузками. Инженерно-геологическое строение площадки представлено оттаявшими многолетнемерзлыми суглинками от тугопластичной до текучепластичной консистенции с залеганием кровли мерзлых грунтов на глубине от 19 до 25 метров. Физико-механические и теплофизические характеристики грунтов представлены в диссертации. Перед началом эксперимента выполнен замер температуры грунтов у каждой сваи, по результатам которого было установлено их оттаявшее состояние (рис. 12).

Рисунок 9 – Общий вид расположения свай

Экспериментальная часть состояла из 2 этапов: этап № 1 – испытания оттаявших многолетнемерзлых грунтов сваями до установки СОУ (рис. 13а); этап № 2 – испытания термостабилизируемых грунтов сваями с мерзлым грунтовым ядром в конце летних периодов (рис. 13б).

На этапе № 2 установили по одному СОУ у свай № 1, 3 (рис. 11а) и по два СОУ у свай № 2, 4 (рис. 11б) производства НПО «Север», произвели

устройство дополнительных термометрических скважин (рис. 11в), погрузили грунтовые марки. Технические характеристики СОУ представлены в диссертации. Общая схема эксперимента на этапе № 2 представлена на рисунке 10.



Условные обозначения:
 * – место установки грунтовой марки
 • – термометрическая скважина (ТС)

Рисунок 10 – Схема расположения СОУ; грунтовых марок; термометрических скважин: а – у свай № 1, 3 с одним СОУ; б – у свай № 2, 4 с двумя СОУ

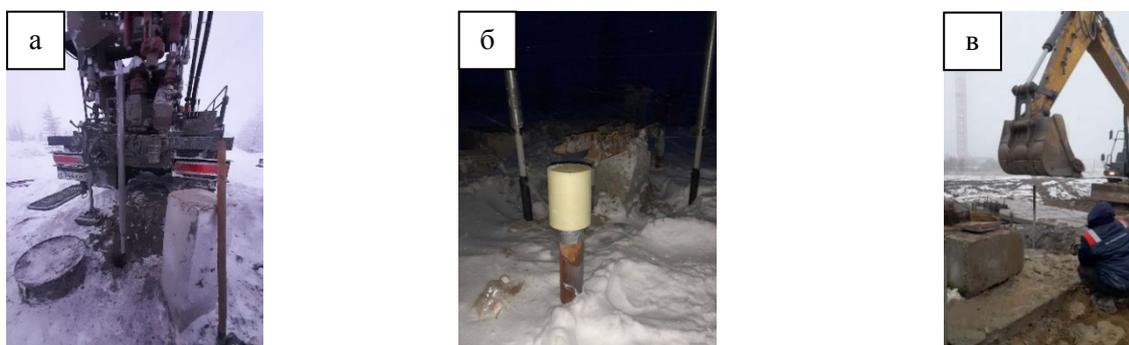


Рисунок 11 – Погружение СОУ (а, б) и устройство термометрических скважин (в)

С октября 2023 г. начался первый цикл термостабилизации грунтов. Замеры температуры грунтов производили непрерывно с регистрацией данных каждые 24 часа. Одновременно с температурным мониторингом проводилось моделирование температурного режима основания в программе Frost 3D. Начальная температура грунтов задавалась по

результатам измерений до начала эксперимента. Граничные условия по дневной поверхности и работа СОУ заданы третьим родом с учетом температуры воздуха и скорости ветра в г. Лабытнанги. По нижней и боковым граням расчетной области был задан поток тепла, равный нулю. По результатам моделирования получено трехмерное распределение температуры грунтов, установлен процесс формирования мерзлых грунтовых ядер вокруг свай, определены их размеры и геометрическое положение. На рисунке 12 представлены температуры грунтов по результатам измерений (усредненные значения) и по данным расчетов в программе Frost 3D.

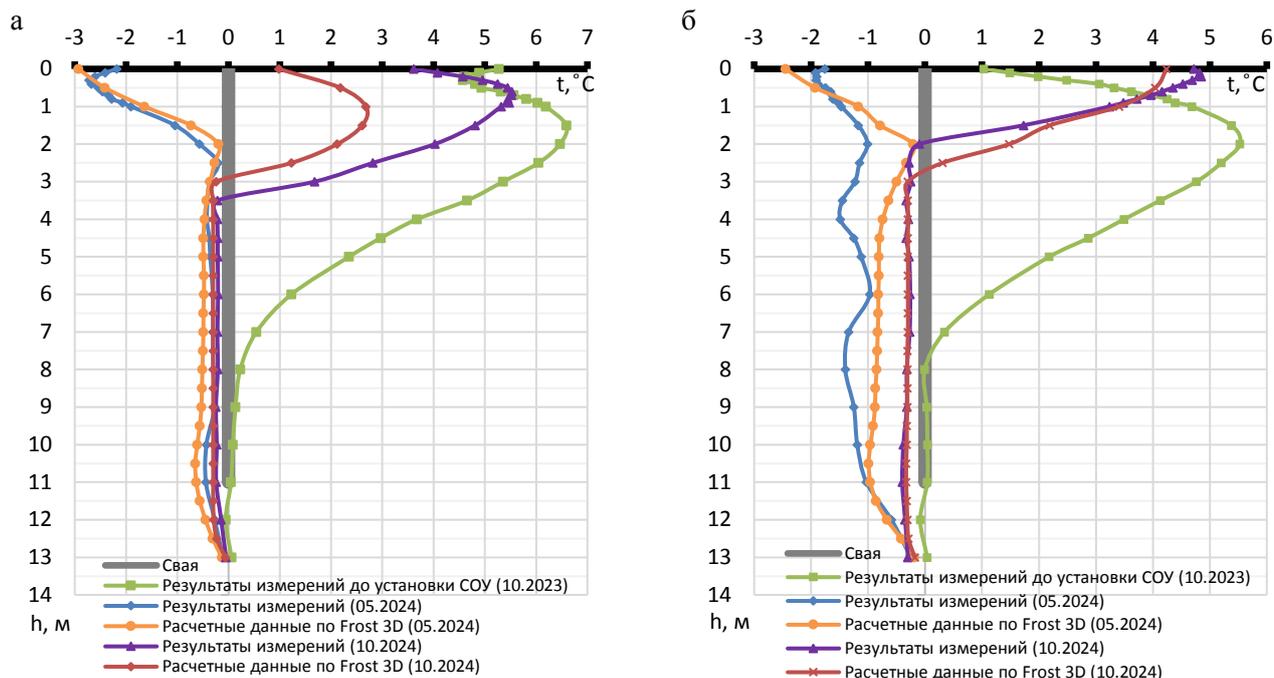


Рисунок 12 – Графики распределения температуры грунтов: а – у свай № 1, 3 с одним СОУ; б – у свай № 2, 4 с двумя СОУ

По данным расчетов в конце летнего периода у свай с одним и двумя СОУ средний диаметр ядра равен 0,8 и 2,3 м, высота – 7,7 и 10 м соответственно. Средняя погрешность размеров ядер по результатам моделирования по отношению к фактическим значениям, определенным методом интерполяции температуры в термометрических скважинах, составляет до 20 %. На этапе № 2 по температурным данным (рис. 12) определены средние значения температуры грунта по боковой поверхности смерзания со сваями без учета мощности деятельного слоя (таблица № 4).

Таблица 4. Температуры грунта по боковой поверхности смерзания со сваями

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

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

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

В конце летнего (сентябрь – октябрь) периода при максимальном оттаивании основания проведены испытания термостабилизируемых грунтов сваями. Испытания показали, что мерзлые грунтовые ядра перемещаются и работают совместно со сваями, что подтверждено данными перемещений свай и грунтовых марок. На рисунке 13б изображен общий вид площадки эксперимента на этапе № 2. Графики зависимости осадки свай от нагрузки на этапах № 1, 2 представлены на рисунках 14, 15.



Рисунок 13 – Общий вид площадки эксперимента: а – на этапе № 1 (октябрь 2023 г.); б – на этапе № 2 в конце летнего периода (сентябрь – октябрь 2024 г.)

Моделирование взаимодействия свай с оттаявшим и термостабилизируемым основаниями проведено в программе Midas, в которой грунт основания и мерзлое грунтовое ядро моделировались упругопластической моделью Мора – Кулона. Расчетные схемы созданы с учетом исходных данных и параметров, соответствующих реальным условиям проведения испытаний. По результатам моделирования построены графические зависимости осадки свай от нагрузки, сопоставленные с данными натуральных испытаний и в соответствии с аналитической методикой (рис. 14, 15).

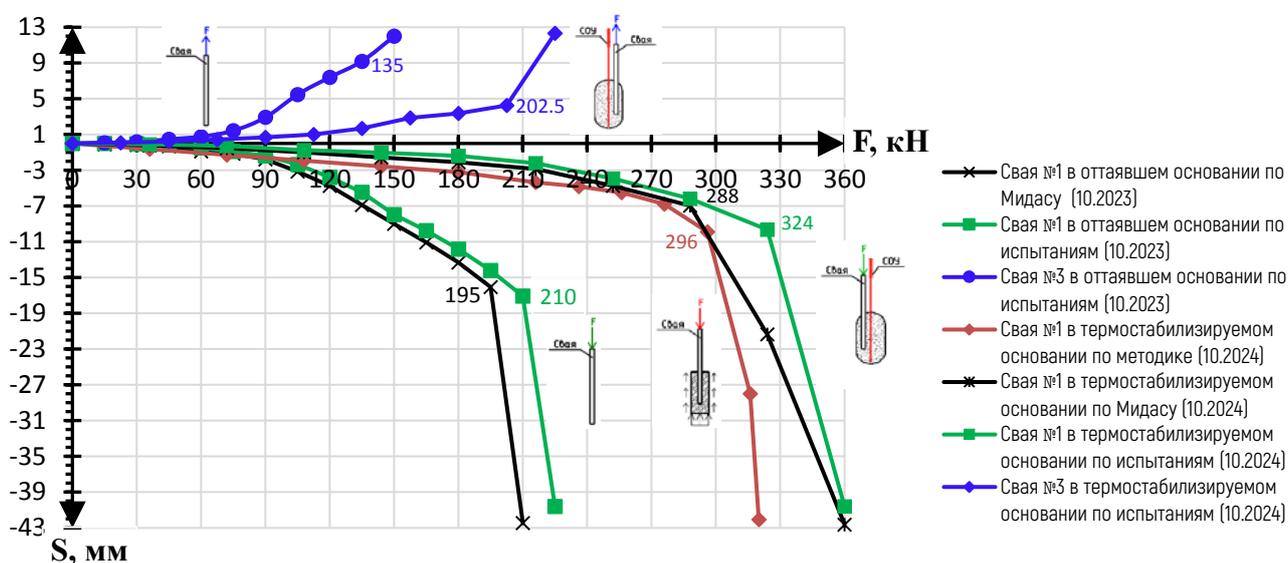


Рисунок 14 – Графики зависимости осадки (выхода) свай № 1, 3 с одним СОУ от нагрузки F

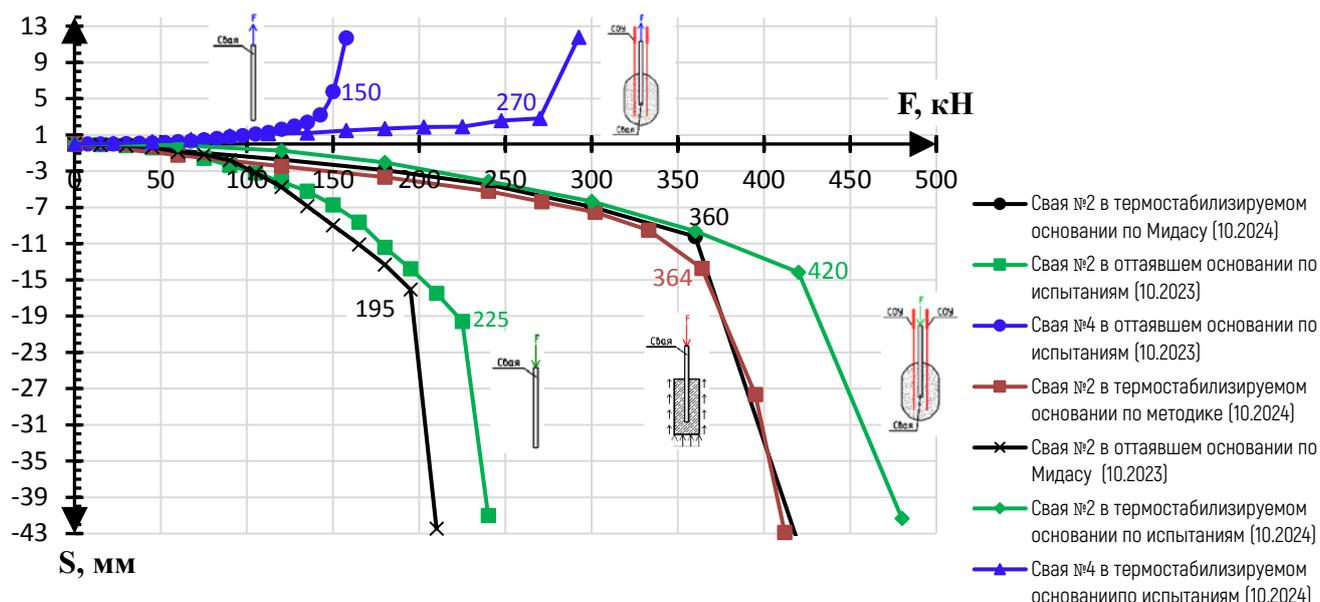


Рисунок 15 – Графики зависимости осадки (выхода) свай № 2, 4 с двумя СОУ от нагрузки F

На основании полученных графиков «нагрузка – осадка» (рис. 14, 15) определено значение несущей способности и ее изменение для свай с одним (сваи № 1, 3) и двумя (сваи № 2, 4) СОУ (таблица 5).

Таблица 5. Несущая способность свай

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

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

В результате проведенных натурных исследований количественно обоснована эффективность термостабилизации оттаявшего многолетнемерзлого основания с пониженным залеганием кровли мерзлоты для увеличения несущей способности одиночной железобетонной сваи. Установлены геометрические параметры формирующегося мерзлого грунтового ядра вокруг сваи и выявлены изменения ее несущей способности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При проектировании объектов в сложных инженерно-геокриологических условиях криолитозоны, в основании которых залегают толщи оттаявших слабых водонасыщенных грунтов с пониженным залеганием кровли мерзлоты, одним из эффективных методов восстановления и увеличения несущей способности одиночной железобетонной сваи является термостабилизация грунтового основания. В результате применения термостабилизации в данных грунтовых условиях вокруг сваи формируется мерзлое грунтовое ядро, геометрические параметры которого определяют эффективность работы сваи в термостабилизируемом основании.
2. Экспериментальными исследованиями по термостабилизации оттаявшего грунтового основания с погруженной в него свайей установлены закономерности изменения температурного режима в зависимости от конструктивных параметров СОУ, типа и начальной температуры грунтов. В результате изменения температурного режима грунтового основания вокруг сваи формируется мерзлое грунтовое ядро, работающее совместно с ней и увеличивающее ее контактную лобовую и боковую поверхности.
3. На основе выполненных экспериментально-теоретических исследований определены основные геометрические размеры (диаметр, высота, объем) и геометрическое положение подошвы формируемого мерзлого грунтового ядра относительно пяты сваи в зависимости от конструктивных параметров СОУ, типа и начальной температуры грунтов основания. Установлено, что для всех типов оттаявших многолетнемерзлых грунтов возможно три варианта геометрического положения подошвы мерзлого ядра: ниже пяты сваи; в одном уровне с пятой сваи; выше пяты сваи.
4. В результате проведенного натурного исследования на экспериментальной площадке, расположенной вблизи г. Лабытнанги (ЯНАО), определено изменение предельно длительного сопротивления одиночной железобетонной сваи в термостабилизируемом основании, сложенном оттаявшими многолетнемерзлыми суглинками. Выявлено, что установка одного СОУ у боковой поверхности сваи увеличивает ее частное значение предельно длительного сопротивления в конце первого летнего периода при действии вдавливающей нагрузки на 54 %, а при действии выдергивающей нагрузки – на 50 %. При установке двух СОУ у боковых поверхностей сваи частное значение предельно длительного сопротивления сваи в конце первого летнего периода при действии вдавливающей нагрузки увеличилось на 86 %, а при действии выдергивающей нагрузки – на 80 %.
5. Разработана аналитическая методика определения осадки одиночной железобетонной сваи в термостабилизируемом грунтовом основании, исходя из известного допущения о раздельной работе пяты и боковой поверхности сваи. Методика учитывает экспериментально выявленные

геометрические параметры формируемого мерзлого грунтового ядра вокруг сваи и позволяет получить кривую «осадки – нагрузки», повторяющую форму экспериментальной кривой. Средняя погрешность по отношению к фактическим значениям составляет до 25 % в запас несущей способности сваи.

6. Установлено, что использование программы Frost 3D позволяет прогнозировать температурный режим оттаявшего многолетнемерзлого основания с точностью до $\Delta T = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ и определять геометрические параметры мерзлого грунтового ядра, формируемого вокруг сваи, со средней погрешностью по отношению к фактическим параметрам до 20 % при термостабилизации СОУ в конце первого летнего периода. Применение Midas позволяет с точностью до 30 % описывать НДС термостабилизируемого основания с погруженной в него одиночной железобетонной свайей при ее статическом нагружении.

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

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных

в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. **Жайсамбаев, Е.А.** Методика определения осадки одиночной сваи в термостабилизируемом основании, сложенном оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами / **Е.А. Жайсамбаев**, Т.В. Мальцева, А.Н. Краев, А.И. Синицкий // Construction and Geotechnics. – 2024. – Т. 15, № 3. – С. 42–55. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.3.04.
2. **Жайсамбаев, Е.А.**, Мальцева Т.В., Краев А.Н. Расчет температурного режима термостабилизируемого основания с одиночной свайей // Construction and Geotechnics. – 2023. – Т. 14, № 4. – С. 5–18. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.4.01.
3. **Жайсамбаев, Е. А.** Экспериментальный стенд для исследования процессов промерзания-оттаивания грунтов основания в лабораторных условиях/ **Е. А. Жайсамбаев**, А. Н. Краев, А. Н. Краев // Транспортные сооружения. – 2020. – Т 7. – № 1. – URL: <https://t-s.today/PDF/16SATs120.pdf>. DOI: 10.15862/16SATs120.

Статьи, опубликованные в других журналах и изданиях:

4. **Жайсамбаев, Е. А.** Одиночная свая в термостабилизируемом грунтовом основании на площадках с заглубленным положением кровли многолетнемерзлых грунтов / **Е. А. Жайсамбаев**, А. Н. Краев, А. И. Синицкий, А. Н. Громадский // Теория и практика фундаментостроения: Сборник тезисов докладов XV Международного симпозиума по реологии

грунтов, посвященного 95-летию КГАСУ и 60-летию кафедры «Основания, фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология», Казань, 04–06 июня 2025 года. – Казань: Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. – С. 66-67. – EDN ZUNYYW.

5. **Жайсамбаев, Е. А.** Вариационный метод расчета грунтового основания во взаимодействии со сваей / Т. В. Мальцева, **Е. А. Жайсамбаев** // Современные методы проектирования, подземного строительства и реконструкции оснований и фундаментов (GFAC 2024): Сборник тезисов Национальной (всероссийской) научно-технической конференции с международным участием, посвященной 90-летию кафедры геотехники (механики грунтов, оснований и фундаментов, инженерной геологии), Санкт-Петербург, 23–25 октября 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. – С. 21. – EDN SPEXME.
6. **Жайсамбаев, Е. А.** Принципы использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований зданий и сооружений / **Е. А. Жайсамбаев** // Материалы Международной научно-практической конференции молодых исследователей им. Д. И. Менделеева, посвященной 10-летию Института промышленных технологий и инжиниринга, Тюмень, 22–26 октября 2019 года / Ответственный редактор А. Н. Халин. Том 2. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. – С. 399-402. – EDN XXQXFA.