

*На правах рукописи*

**Баева Елена Константиновна**



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
СВАЙНЫХ ОСНОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПЛАТФОРМ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ**

*Специальность 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

*Трушко Владимир Леонидович*

**Официальные оппоненты:**

*Сарычев Владимир Иванович*

доктор технических наук, доцент федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», профессор кафедры механики материалов и геотехнологий;

*Куранов Антон Дмитриевич*

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Институт Гипроникель», директор по проектированию технологических дисциплин.

**Ведущая организация** – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва.

Защита диссертации состоится **16 июля 2026 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 15 мая 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ  
Павел Игоревич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Освоение богатейших минерально-сырьевых ресурсов Арктической зоны Российской Федерации в соответствии с Государственной программой «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации» (Постановление Правительства РФ от 30.03.2021 №484) неразрывно связано с развитием инфраструктуры нефтегазовой и горнодобывающей промышленности, ключевым элементом которой являются технологические платформы.

Применяемые в настоящее время технологические решения в виде насыпных сооружений характеризуются сложностью и высокой стоимостью строительства, а также экологическими ограничениями и необходимостью последующей рекультивации территорий. Перспективным направлением является создание мобильных свайных технологических платформ, позволяющих избежать существующие ограничения.

Строительство мобильных технологических платформ и сохранение их работоспособности в условиях изменения климата, вызывающего деградацию многолетнемерзлых пород (далее ММП), требует исследования изменения свойств горных пород в криолитозоне и изучение процесса их взаимодействия с элементами технологических платформ.

Поэтому научная задача геомеханического обоснования и расчета напряженно-деформированного состояния (далее НДС) системы «свайное основание-мерзлый массив» весьма актуальна для обеспечения работоспособности технологических платформ и повышения эффективности инфраструктурного строительства в Арктической зоне России.

### **Степень разработанности темы исследования**

Исследованием НДС массива горных пород, включая криолитозону, занимались такие ученые, как Вялов С. С., Ершов Э. Д., Зарецкий Ю. К., Кроник Я. А., Куранов А. Д., Сарычев В. И., Трушко В. Л., Хрусталева Л. Н., Цытович Н. А., Andersland O. B., Arenson L. U., Ladanyi B., Lai Y., Ma W., Qi J., Sayles F. H., Springman S. M., Ting J. M. и другие.

Большой вклад в исследование физических и механических свойств мерзлых пород внесли такие отечественные ученые, как Абжалимов Р. Ш., Аксенов В. И., Емельянова Т. Я., Крамаренко В. В., Кудрявцев С. А., Мазуров Г. П., Муравьев Ф. А., Невзоров А. Л., Пчелинцев А. М., Роман Л. Т., Савельев Б. А. и другие.

Изучением влияния температуры на прочность мерзлых пород занимались Вотяков И. Н., Гольдштейн М. Н., Пекарская Н. К., Сумгин М. И., Шушерина Е. П., Baker T., Chamberlain E. J., Gow A. J., Haynes F. D., Hu X., Jones S. J., Othman M. A., Parameswaran V. R., Viklander P., Wang J. T., Yang Y., Yu J. и другие.

**Объект исследований** – массив многолетнемерзлых пород, включающий засоленные участки.

**Предмет исследований** – процессы изменения НДС и термического режима системы «свайное основание – многолетнемерзлый массив» под влиянием комплекса природных и техногенных факторов.

**Цель работы** – повышение несущей способности свайных оснований технологических платформ при эксплуатации в условиях криолитозоны.

**Идея работы** заключается в обосновании повышения несущей способности свайных оснований технологических платформ в криолитозоне на основе выявленных закономерностей изменения НДС системы «свайное основание – многолетнемерзлый массив», путем применения рационального термомеханического режима строительства технологических платформ и технологии возведения свай с пробкой-пятой, повышающей лобовое сопротивление торца сваи.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения следующих **задач**:

1. Научное обобщение и анализ применяемых способов возведения технологических платформ, физико-механических свойств ММП и методов расчета свайных оснований в условиях криолитозоны.

2. Натурные и лабораторные исследования деформационно-прочностных свойств ММП и изменения их термического режима при устройстве свайных оснований.

3. Обоснование и разработка модели поведения системы «свая – мерзлый массив».

4. Исследование и количественная оценка на основе численного моделирования влияния основных природных и техногенных факторов на несущую способность и деформируемость свайных оснований технологических платформ в условиях криолитозоны.

5. Разработка практических рекомендаций по выбору параметров свайных оснований для типовых инженерно-геокриологических условий строительства технологических платформ в криолитозоне.

**Научная новизна работы:**

1. Выявлена и количественно оценена нелинейная зависимость предельно-длительного сопротивления срезу мерзлых пород по боковой поверхности от совместного влияния степени засоленности и литологического состава, что позволяет количественно учитывать физико-химический механизм ослабления адгезионных связей и повысить достоверность долгосрочного прогноза осадок свайных оснований технологических платформ.

2. Разработана методика выбора и параметризации численных моделей для системы «свая-мерзлый массив» на основе предложенного критерия, учитывающего вносимое в мерзлый массив тепло от гидратации, что позволило повысить точность оценки несущей способности сваи во времени.

3. Обоснован механизм перераспределения несущей способности свай в модульных свайных основаниях при работе в засоленных ММП: доказано, что применение технологии с пробкой-пятой в условиях сниженной адгезии по боковой поверхности, вызванной засолением, обеспечивает компенсационный эффект, кратно повышая эффективность включения в работу лобового сопротивления мерзлого массива сжатию.

4. Установлено влияние термомеханического фактора на кинетику восстановления температурного поля мерзлого массива, что позволило уточнить методику прогноза сроков обратного смерзания, устранив погрешность определения несущей способности на ранних сроках формирования свайного основания.

Содержание работы соответствует паспорту научной специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика по п.п. 3 и 5, а именно:

п. 3. Изменения свойств горных пород и грунтов в образцах и в естественных условиях в массиве в результате воздействия механических, тепловых, электромагнитных, физико-химических и других полей.

п. 5. Теоретические основы, математические модели и способы управления состоянием и поведением массивов горных пород и грунтов с целью обеспечения устойчивости горных выработок, подземных и наземных сооружений, предотвращения проявлений опасных горно-геологических явлений.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Развита теория численного моделирования системы «свая-мерзлый массив» путем введения в расчетные модели температурного градиента вдоль сваи как фактора, определяющего изменение несущей способности по поверхности смерзания во времени, что уточняет существующие модели, оперирующие осредненной температурой пород.

2. Выявлена инвариантность модуля общей деформации к фазовому составу влаги при температуре  $-3^{\circ}\text{C}$  для засоленных мерзлых пород с криогенной структурой, позволяющая разделить факторы, влияющие на прочность и жесткость при построении численных моделей.

3. Определены параметры контактного интерфейса и деформационных свойств для типовых ММП криолитозоны, применение которых в численных расчетах позволяет повысить точность прогнозирования осадок и НДС свайных оснований технологических платформ по сравнению с классическими моделями.

4. Разработаны практические рекомендации по определению рациональных параметров свайных оснований и безопасных сроков начала нагружения проектными нагрузками технологических платформ на основе результатов численного моделирования с использованием верифицированных моделей, что позволяет повысить работоспособность и долговечность сооружений.

5. Результаты и рекомендации диссертационной работы приняты к использованию при ведении изыскательной и экспертной работы в деятельности ООО «ЦГЭИ» при разработке технико-коммерческих предложений и рекомендаций для проектирования объектов

на арктическом шельфе и в других районах криолитозоны. Акт о внедрении от 7 мая 2025 г., утвержден генеральным директором Г.И. Болотниковым.

#### **Методология и методы исследования**

Методологическую основу исследования составляет комплексный подход, включающий теоретический анализ существующих методов расчета и современных численных моделей для прогнозирования поведения свайных оснований в ММП, проведение обширной программы лабораторных экспериментов, включающей компрессионные испытания, испытания методом шарикового штампа и одноплоскостного среза по поверхности смерзания, статистическую обработку и регрессионный анализ экспериментальных данных для установления зависимостей, описывающих влияние литологии, льдистости и засоленности на прочностные и деформационные свойства мерзлых пород, а также численное моделирование методом конечных элементов в программных комплексах для решения термомеханической задачи по оценке влияния технологического тепловыделения при бурении и гидратации на сроки обратного смерзания и прогноза НДС свай с пробкой-пятой с разработкой практических рекомендаций для проектирования.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Снижение предельно длительного сопротивления срезу мерзлых пород основания технологических платформ по поверхности смерзания носит литологически детерминированный характер: для связных дисперсных пород оно описывается нелинейной степенной зависимостью от засоленности с показателем степени  $\alpha$  от 1,97 до 2,31, отражающим интенсивное снижение ледоцементных контактов, тогда как для несвязных пород подчиняется линейному закону, обусловленному преобладанием сил трения и отсутствием коагуляционных связей.

2. Несущая способность свайных оснований по боковой поверхности в засоленных многолетнемерзлых породах определяется кинетикой температурно-прочностной стабилизации контактной зоны, время завершения которой нелинейно возрастает с увеличением засоленности пород при рассеянии тепла гидратации бетона и описывается предложенной функцией.

3. Эффективное управление напряженно-деформированным состоянием основания технологических платформ в условиях сниженного бокового сцепления засоленных пород достигается применением модульных свай с пробкой-пятой, обеспечивающей перераспределение нагрузки с ослабленной поверхности смерзания на лобовое сопротивление торца сваи, что повышает несущую способность в 1,6 раза и локализует зоны пластических деформаций под пятой сваи.

**Степень достоверности результатов исследования** подтверждается корректной постановкой цели и задач диссертационной работы, хорошей сходимостью результатов моделирования с экспериментальными данными, применением комплексного подхода, сочетающего экспериментальную проверку, использование признанных методов и подтверждение полевыми испытаниями.

**Апробация результатов.** Основные вопросы, рассмотренные в диссертационной работе, были освещены на следующих конференциях: XI форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства, 2022 г., Минск; Всероссийская конференция с международным участием «II Лавёровские чтения – Арктика: актуальные проблемы и вызовы» 2023 г., Архангельск; 16 Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» 2023 г., Москва; XX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» 2024 г., Санкт-Петербург; Международный научный симпозиум «Неделя горняка» 2025 г., Москва; 17 Международная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» 2025 г., Москва.

**Личный вклад автора:** автором были поставлены задачи диссертации, проанализирован широкий перечень отечественных и зарубежных научных трудов по тематике исследования, разработаны методические подходы и выполнен комплекс лабораторных испытаний, обоснована и построена численная модель мерзлых пород и определены ее параметры. Обоснована необходимость учета влияния термомеханических факторов на НДС свайных оснований технологических платформ, а также сформулированы рекомендации по применению полученных зависимостей и подбору рациональных параметров свайных оснований.

### **Публикации:**

Полученные в результате диссертационного исследования результаты были опубликованы в 4 печатных работах, в том числе в 1 статье – в издании из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получен 1 патент.

**Структура диссертации.** Диссертационная работа содержит в себе следующие структурные элементы: оглавление, введение, 4 главы с выводами по каждой, а также заключения и списка литературы, который включает в себя 175 наименования. Работа изложена на 128 страницах машинописного текста, содержит 45 рисунков и 23 таблицы.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен анализ современного состояния вопроса возведения и эксплуатации свайных оснований в условиях криолитозоны. Рассмотрены существующие методы расчета несущей способности и прогнозирования теплового взаимодействия свай с ММП. Выявлены ограничения существующих методик, заключающиеся в недостаточном учете влияния засоленности, льдистости и технологических факторов на деформационно-прочностные характеристики свайных оснований. На основе проведенного анализа обоснована необходимость совершенствования технологических решений и применения современных геомеханических моделей для прогноза поведения системы «свайное основание – мерзлый массив».

**Во второй главе** представлена методика и результаты комплексных лабораторных исследований физико-механических свойств мерзлых пород. Описана программа испытаний, включающая компрессионное сжатие, определение прочности на сдвиг по поверхности смерзания с материалом сваи и испытания методом шарикового штампа. Представлены экспериментальные данные для различных

типов мерзлых пород с учетом их фазового состава и засоленности. По результатам испытаний установлена зависимость модуля деформации от степени заполнения пор льдом и незамерзшей водой, количественно оценено снижение сопротивления сдвигу по поверхности смерзания для засоленных пород, получены данные для верификации расчетных моделей.

**В третьей главе** сформулированы теоретические положения и методологический подход к численному моделированию термомеханического поведения свайных оснований. На основе экспериментальных данных обоснован выбор и выполнена калибровка параметров численной модели мерзлых пород, учитывающая снижение прочности смерзания при засолении. Разработана модель системы «свайное основание – мерзлый массив», учитывающая эффект гидратации бетона. Выполнена верификация модели путем сопоставления результатов численного моделирования с данными полевых испытаний свай, подтвердившая адекватность выбранных подходов.

**В четвертой главе** выполнено геомеханическое обоснование параметров свайных оснований технологических платформ. На основе верифицированной модели проведена серия численных экспериментов по оценке влияния конструктивных параметров свай, температурного режима и свойств засоленных пород на несущую способность основания. Разработаны практические рекомендации по назначению расчетных характеристик пород с учетом засоленности и влияния термомеханического фактора на кинетику восстановления температурного поля вокруг свай различного диаметра для обеспечения эксплуатационной работоспособности. Предложен способ сооружения модульных свай с пробкой-пятой. Проведено технико-экономическое обоснование практического применения разработанных рекомендаций в условиях освоения месторождений полуострова Ямал.

**В заключении** сформулированы основные результаты проведенного исследования, а также направления дальнейших исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Снижение предельно длительного сопротивления срезу мерзлых пород основания технологических платформ по поверхности смерзания носит литологически детерминированный характер: для связанных дисперсных пород оно описывается нелинейной степенной зависимостью от засоленности с показателем степени  $\alpha$  от 1,97 до 2,31, отражающим интенсивное снижение ледоцементных контактов, тогда как для несвязанных пород подчиняется линейному закону, обусловленному преобладанием сил трения и отсутствием коагуляционных связей.**

Для установления закономерностей изменения прочностных и деформационных свойств мерзлых пород и параметров их взаимодействия со свайными основаниями при заданном температурном режиме было отобрано 380 образцов с п-ова Ямал и выполнен комплекс лабораторных испытаний, включающий испытания методами компрессионного сжатия, среза по поверхности смерзания и испытания шариковым штампом.

Обобщение результатов позволило выявить фундаментальное различие в механизме снижения прочности при засолении для разных литотипов (Рисунки 1-4).

Для связанных пород (глина, суглинок, супесь) установлено, что классическая линейная аппроксимация не в полной мере отражает резкое падение прочности в диапазоне малых концентраций солей. Разработана уточненная нелинейная модель вида (1):

$$R_{af} = \frac{R_0}{1 + k \cdot D_{sal}^\alpha}, \quad (1)$$

где  $R_{af}$  – предельно-длительное значение сопротивления срезу по поверхности смерзания пород с материалом сваи при заданной засоленности, МПа;  $R_0$  – базовое предельно-длительное значение сопротивления срезу для незасоленной породы, МПа;  $D_{sal}$  – степень засоленности, д.е.·100;  $k$  – коэффициент, характеризующий интенсивность ослабления контактной прочности;  $\alpha$  – показатель степени нелинейности.

Статистический анализ показал, что показатель степени нелинейности  $\alpha$  для данной группы пород стабильно принимает значения в диапазоне 1,97–2,31. Это свидетельствует о том, что прочность связанных пород определяется преимущественно ледоцементными связями,

которые разрушаются квадратично относительно роста концентрации порового раствора.

Для несвязных пород (песков) снижение прочности описывается функцией (2):

$$y = 0,253 - 0,14x, \quad (2)$$

где  $y$  – предельно длительное сопротивление срезу по поверхности смерзания ( $R_{af}$ );  $x$  – степень засоленности ( $D_{sal}$ ).

Такой характер зависимости объясняется сохранением скелетного трения минеральных частиц даже при частичном плавлении ледоцементов.

Параметры моделей для различных типов пород приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Параметры моделей ослабления прочности смерзания

Тип пород	Модель	$R_0$ , МПа	$k$	$\alpha$	Коэффициент детерминации $R^2$
Песок	Линейная	0,253	0,14	-	0,87
Супесь	Степенная	0,220	2,02	2,31	0,55
Суглинок	Степенная	0,186	2,31	2,23	0,53
Глина	Степенная	0,171	1,55	1,97	0,59

Разработанная математическая модель выведена с целью повышения достоверности определения НДС системы «свайное основание – мерзлый массив» и служит основой для корректного задания свойств контактного взаимодействия при численном моделировании.

**2. Несущая способность свайных оснований по боковой поверхности в засоленных многолетнемерзлых породах определяется кинетикой температурно-прочностной стабилизации контактной зоны, время завершения которой нелинейно возрастает с увеличением засоленности пород при рассеянии тепла гидратации бетона и описывается предложенной функцией.**

Обобщение результатов численного моделирования нестационарных тепловых процессов, верифицированного данными натурных термометрических наблюдений и лабораторных испытаний, позволило установить закономерности изменения НДС и

температурного режима контактной зоны «свайное основание – мерзлый массив».

Доказано, что для достоверного прогноза несущей способности свайных оснований технологических платформ критически важно учитывать тепловую энергию, вносимую в породный массив за счет экзотермической реакции гидратации бетона. Совокупный эффект технологического тепловыделения и снижения температуры начала замерзания  $T_{bf}$  в засоленных породах приводит к значительному увеличению длительности набора прочности смерзания по боковой поверхности.

Распределение температурного режима на контакте «свайное основание – мерзлый массив» представлено на рисунке 5. Графики наглядно демонстрируют смещение спектра фазовых переходов при увеличении засоленности. Изменение температурного режима напрямую определяет фазовый состав влаги на контакте, который, в свою очередь, является главным фактором формирования прочности смерзания, определяющей несущую способность свайного основания и НДС системы.

Установлено, что время набора полной прочности смерзания по боковой поверхности  $t_{rec}$  описывается аналитической степенной зависимостью (3):

$$t_{rec} = t_{base} + k_{ph} \cdot D_{sal}^{\alpha} \quad (3)$$

где  $t_{base}$  – время, необходимое для набора полной прочности смерзания для незасоленных пород данного типа с учетом рассеяния тепла бетона, сут;  $k_{ph}$  – эмпирический параметр длительности фазовых переходов, сут;  $\alpha$  – показатель степени нелинейности;  $D_{sal}$  – степень засоленности, д.е. · 100.

Параметры предложенной модели, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры стабилизации НДС контактной зоны

Тип пород	$t_{base}$ , сут	$k_{ph}$ , сут	$\alpha$
Глина	86,2	83,9	1,40
Суглинок	50,6	106,6	0,52
Песок	15,0	120,5	0,34

Номограмма набора прочности смерзания свайных оснований с мерзлыми породами различной степени засоленности представлена на рисунке 6. Разработанная на базе модели номограмма позволяет

прогнозировать набранную несущую способность по боковой поверхности и уточнить срок безопасного нагружения свайного основания.

Обобщение результатов численного моделирования позволило установить параметры зоны растепления мерзлого массива вблизи свайного основания радиусом  $r_0 = 0,325$  м (Рисунки 7-10). Доказано, что внесение технологического тепла приводит к образованию кольцевой зоны растепления, параметры которой зависят от типа и засоленности пород (Таблица 3).

Таблица 3 – Параметры зоны растепления

Тип пород	Засоленность, %	Радиус растепления, м	Прирост радиуса талой зоны, %
Глина	Незасоленная	0,413	0,0
	Слабозасоленная	0,429	3,9
	Среднезасоленная	0,433	4,8
	Сильнозасоленная	0,471	14,0
Суглинок	Незасоленный	0,392	0,0
	Слабозасоленный	0,403	2,8
	Среднезасоленный	0,430	9,7
Супесь	Незасоленная	0,398	0,0
	Слабозасоленная	0,436	9,5
Песок	Слабозасоленный	0,397	0,0
	Среднезасоленный	0,399	0,5
	Сильнозасоленный	0,389	-2,0

Незначительное снижение радиуса зоны растепления в сильнозасоленных песках объясняется их специфическими теплофизическими свойствами. Из-за низкой температуры начала замерзания и минимального содержания льда-цемента, тепло гидратации расходуется преимущественно на кондуктивный прогрев массива, а не на скрытую теплоту фазовых переходов, что размывает границы зоны протаивания по сравнению с дисперсными породами.

Таким образом, доказано, что экзотермический эффект твердения бетона в сочетании со снижением температуры начала замерзания засоленных пород приводит к формированию вокруг сваи кольцевой зоны растепления (от 0,38 до 0,47 м). Время набора прочности смерзания в этой зоне нелинейно и может превышать нормативное

время набора прочности бетона в 3-5 раз. Внедрение предложенной аналитической модели зависимости  $t_{rec}$  от  $D_{sal}$  позволяет достоверно прогнозировать несущую способность свайных оснований криолитозоны во времени.

**3. Эффективное управление напряженно-деформированным состоянием основания технологических платформ в условиях сниженного бокового сцепления засоленных пород достигается применением модульных свай с пробкой-пятой, обеспечивающей перераспределение нагрузки с ослабленной поверхности смерзания на лобовое сопротивление торца сваи, что повышает несущую способность в 1,6 раза и локализует зоны пластических деформаций под пятой сваи.**

Эффективность управления НДС основания технологических платформ в значительной степени зависит от способа передачи нагрузки на мерзлый массив. Эффект конструктивной модификации сваи был исследован с учетом верифицированных моделей, описывающих снижение прочности смерзания от засоленности. На основании построенных конечно-элементных моделей изучены влияние засоленности пород на развитие зон пластической деформации вдоль тела сваи, влияние геометрии опирания (стандартная свая/свая с пробкой-пятой) на перераспределение полей напряжений, влияние технологии устройства на активацию лобового сопротивления пород, выраженную через вертикальные нормальные напряжения под пятой сваи.

В результате численного моделирования выявлено, что установка пробки-пяты обеспечивает значительное увеличение несущей способности, варьирующееся в диапазоне от 35,2% до 63,3%. Установлено, что наибольший относительный прирост (+48,2%...+63,3%) наблюдается в наиболее слабых, засоленных породах, что подтверждает высокую эффективность технологии в сложных геокриологических условиях.

Применение модульных свай с пробкой-пятой меняет механизм работы основания. При малых нагрузках работа сваи обеспечивается остаточным сдвиговым сцеплением по боковой поверхности, однако по мере исчерпания несущей способности контакта, нагрузка

перераспределяется на пробку-пяту. Зависимости «несущая способность-осадка» для свай с пробкой-пятой и свай без пробки пяты представлены на рисунках 11, 12.

Анализ распределения нагрузки при достижении предельного состояния представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Распределение нагрузки при достижении предельной несущей способности

Порода	Общая несущая способность, кН	Сопротивление по боковой поверхности, кН	Сопротивление по пяте, кН	Доля нагрузки на пяте, %
Незасоленные породы				
Глина	1420	775	645	45,4
Суглинок	1300	760	540	41,5
Супесь	1250	730	520	41,6
Засоленные породы				
Глина	830	485	345	41,6
Суглинок	820	480	340	41,5
Супесь	800	470	330	41,3

Количественно подтвержден эффект трансформации механизма передачи нагрузки в системе «свайное основание – мерзлый массив». Установлено, что в предлагаемом решении значительную часть нагрузки (от 41,3% до 45,4%) воспринимает пробка-пята. Выявлена независимость значений несущей способности, обеспечиваемой пробкой-пятой, от типа пород и степени засоленности. Это доказывает, что в условиях снижения сил смерзания по боковой поверхности, стабильный лобовой отпор компенсирует эту потерю, позволяя существенно повысить общую несущую способность и гарантировать устойчивость свайного основания.

Количественно эффективность предлагаемого конструктивного решения по повышению несущей способности в засоленных мерзлых породах можно описать коэффициентом конструктивного упрочнения  $k_{str}$ , который определяется как отношение предельной нагрузки для свай с пробкой-пятой  $F_u^{mod}$  к предельной нагрузке традиционной свай  $F_u^{std}$  в идентичных породных условиях (4):

$$k_{str} = \frac{F_u^{mod}}{F_u^{std}} \quad (4)$$

Зависимость коэффициента конструктивного упрочнения от степени засоленности  $D_{sal}$  представлена в таблице 5.

Установлено, что эффективность применения свай с пробкой-пятой нелинейно возрастает пропорционально росту концентрации солей в поровом растворе.

Таблица 5 – Расчетные коэффициенты

Порода	$D_{sal}, \%$	$F_u^{std}$	$F_u^{mod}$	$k_{str}$
Глина	0,14	1050	1420	1,35
	0,31	958	1310	1,37
	0,51	859	1190	1,39
	1,00	560	830	1,48
Суглинок	0,12	920	1300	1,41
	0,34	691	1032	1,49
	0,52	510	820	1,61
Супесь	0,10	825	1250	1,52
	0,23	490	800	1,63

Установлено, что эффективность применения свай с пробкой-пятой нелинейно возрастает пропорционально росту концентрации солей в поровом растворе. Для сильнозасоленных пород, где предельная нагрузка по боковой поверхности резко падает, коэффициент  $k_{str}$  достигает значений 1,48–1,63.

На основе полученных результатов предлагается модифицированное условие обеспечения несущей способности  $F_u^{mod}$  свай с пробкой-пятой в засоленных ММП (5):

$$F_u^{mod} = \gamma_t \gamma_c \left( \sum_{i=1}^n R_{af,i}(D_{sal}) \cdot A_{af,i} + k_{str} \cdot R \cdot A \right) \quad (5)$$

где  $F$  – расчетная вертикальная нагрузка на свайное основание, кН;  $\gamma_n$  – коэффициент надежности по назначению сооружения;  $\gamma_t$  – температурный коэффициент;  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы основания;  $R_{af,i}(D_{sal})$  – расчетное сопротивление мерзлой породы сдвигу по боковой поверхности смерзания;  $A_{af,i}$  – площадь поверхности смерзания с боковой поверхностью свай, м<sup>2</sup>;  $R$  – расчетное сопротивление мерзлой породы под нижним концом свай,

кПа;  $A$  – площадь опирания сваи (площадь пробки-пяты),  $m^2$ ;  $k_{str}$  – коэффициент конструктивного упрочнения (для традиционных свай  $k_{str} = 1$ , для свай с пробкой-пятой определяется по номограмме (Рисунок 13)).

Таким образом, предложенный подход позволяет компенсировать снижение несущей способности в засоленных породах за счет трансформации механизма передачи нагрузки на мерзлый массив.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации представлены результаты достижения научно-исследовательской цели геомеханического обоснования параметров свайных оснований технологических платформ в условиях криолитозоны. В ходе исследования были достигнуты следующие ключевые результаты:

1. На основе научного обобщения и анализа применяемых способов возведения технологических платформ, свойств ММП и методов расчета свайных оснований обоснована необходимость уточнения геомеханических моделей с учетом физико-химического влияния засоленности и техногенного теплового воздействия. Установлено, что игнорирование этих факторов ведет к погрешностям при оценке несущей способности.

2. По результатам комплекса натурных и лабораторных исследований деформационно-прочностных свойств ММП и изменения термического режима при устройстве свайных оснований выявлены следующие физические закономерности:

– Установлено, что с ростом концентрации порового раствора предельно длительное сопротивление срезу по поверхности смерзания связных пород снижается по нелинейному степенному закону. Учет этой зависимости позволяет корректно оценивать несущую способность в диапазоне малых концентраций солей.

– Доказано, что механизм взаимодействия на контакте «свайное основание – ММП» для связных пород характеризуется формированием зоны упрочнения, прочность которой сопоставима с внутренней прочностью мерзлого массива.

– Выявлен механизм изменения термического состояния основания при внесении технологического тепла (гидратация бетона),

что позволило описать временные параметры набора прочности модифицированной функцией тепловой стабилизации.

3. Обоснована и разработана комплексная численная модель системы «свайное основание – многолетнемерзлый массив». Разработанный подход к моделированию позволяет учитывать выявленные закономерности контактного взаимодействия и нелинейное влияние засоленности на прочностные и теплофизические свойства пород, существенно повышая достоверность термомеханического прогноза устойчивости оснований.

4. На основе численного моделирования выполнена количественная оценка влияния природных и техногенных факторов на несущую способность и деформируемость свайных оснований. В частности, количественно описан механизм смены работы основания при использовании модульных свай с пробкой-пятой. Подтверждена способность данного разработанного конструктивного решения повысить несущую способность основания в 1,6 раза за счет локализации зон пластических деформаций в области уплотнения под торцом сваи.

5. Разработаны практические рекомендации по выбору параметров свайных оснований для типовых инженерно-геокриологических условий строительства технологических платформ (в том числе для обустройства месторождений п-ова Ямал). Предложены номограммы для определения допустимых сроков начала нагружения и коэффициентов конструктивного упрочнения в зависимости от засоленности пород. Это позволяет количественно обосновывать проектные решения и полностью устранять риск преждевременного нагружения свайных оснований.

6. Достоверность полученных аналитическим и численным путем результатов комплексно подтверждена верификацией на основе данных собственных лабораторных испытаний и литературных источников. Верификация показала высокую сходимость результатов для связанных пород с коэффициентом детерминации  $R^2$  в диапазоне 0,53–0,59.

В целом, результаты работы углубляют теоретические представления о работе свайных оснований в сложных инженерно-геологических условиях криолитозоны. Дальнейшие исследования могут

быть посвящены изучению реологических свойств (длительной прочности) засоленных пород при циклическом изменении температуры.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Трушко, В. Л. Обоснование модели напряженно-деформированного состояния массива мерзлых горных пород / В. Л. Трушко, Е. К. Баева // *Маркшейдерия и недропользование*. – 2024. – № 1(129). – С. 73-79. – DOI 10.56195/20793332\_2024\_1\_73\_79.

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

2. Трушко, В. Л. Обоснование рациональных параметров крепи комплекса горных выработок, проводимых в сложных горно-геологических условиях / В. Л. Трушко, Е. К. Баева // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2023. – № 12. – С. 55-69. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2023\_12\_0\_55.

3. Trushko, V. L., Baeva, E. K., Blinov, A. A. Experimental Investigation on the Mechanical Properties of the Frozen Rocks at the Yamal Peninsula, Russian Arctic // *Eng.* – 2025. – №6(76). DOI: 10.3390/eng6040076.

4. Trushko, V. L. et al. Geomechanical Substantiation of the Technology of Constructing Modular Pile Foundations of Technological Platforms in Permafrost Rocks // *Geotechnics*. – 2025. – №5(79). DOI: 10.3390/geotechnics5040079.

*Патент:*

5. Патент № 2841446. Российская Федерация, СПК E02D 27/35 (2025.01). Способ сооружения свай в криолитозоне. Заявка №2024126821: заявл. 12.09.2024; опубл. 06.06.2025 / В. Л. Трушко, В. Я. Климов, Е. К. Баева, А. Ю. Ожигин; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 14 с.

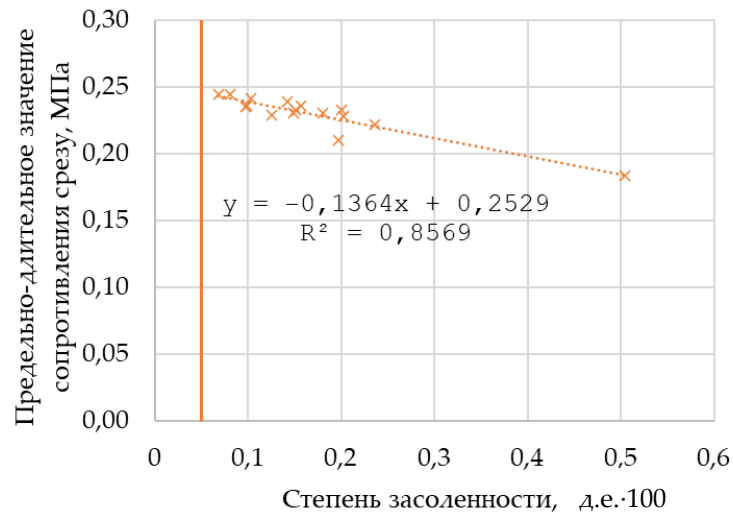


Рисунок 1 – Зависимость предельно-длительного сопротивления сдвигу по поверхности смерзания  $R_{af}$  мерзлых песков от степени засоленности  $D_{sal}$  с линейной аппроксимацией

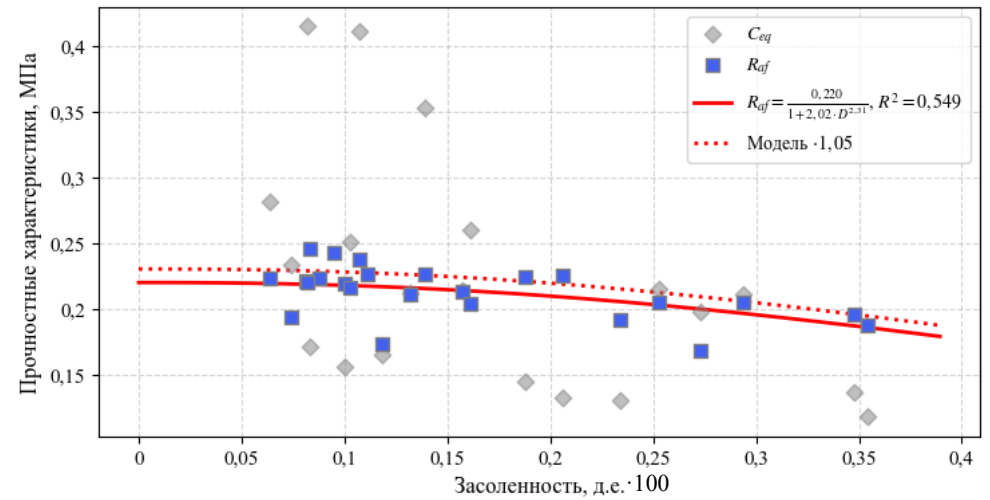


Рисунок 2 – Зависимость прочности смерзания  $R_{af}$  и эквивалентного сцепления  $C_{eq}$  мерзлых супесей от степени засоленности  $D_{sal}$  с результатами аппроксимации предложенной нелинейной модели

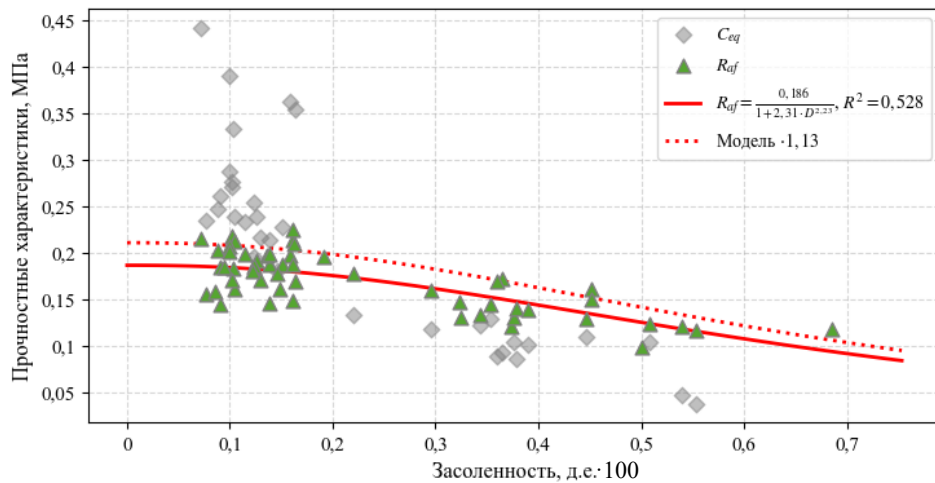


Рисунок 3 – Зависимость прочности смерзания  $R_{af}$  и эквивалентного сцепления  $C_{eq}$  мерзлых суглинков от степени засоленности  $D_{sal}$  с результатами аппроксимации предложенной нелинейной модели

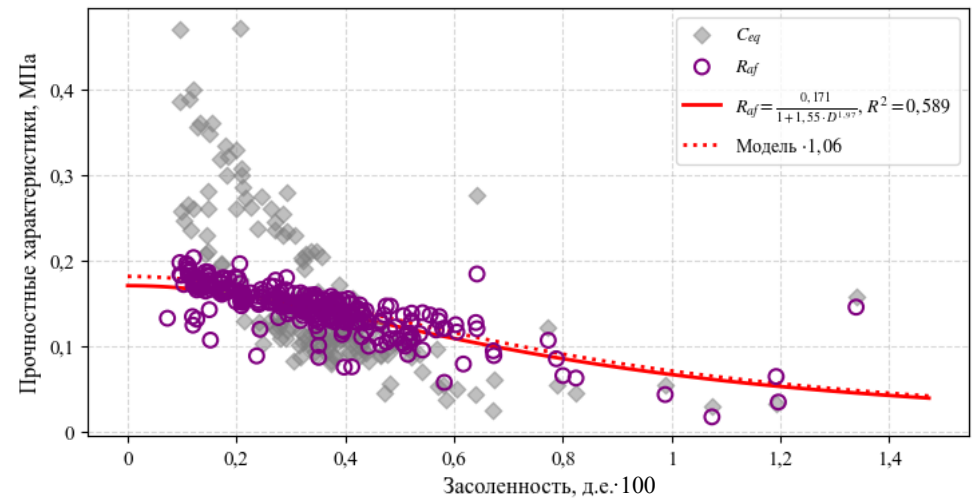


Рисунок 4 – Зависимость прочности смерзания  $R_{af}$  и эквивалентного сцепления  $C_{eq}$  мерзлых глин от степени засоленности  $D_{sal}$  с результатами аппроксимации предложенной нелинейной модели

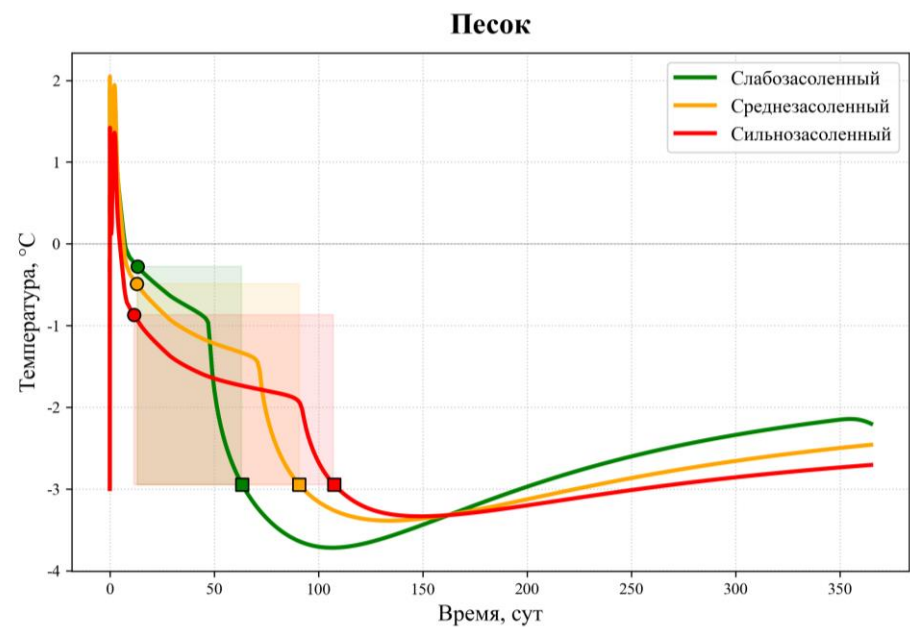
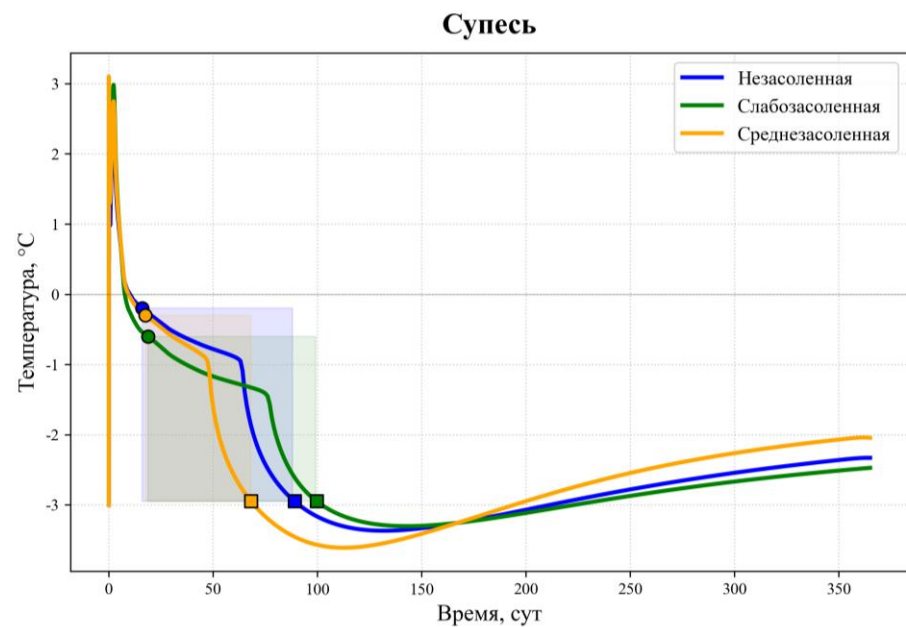
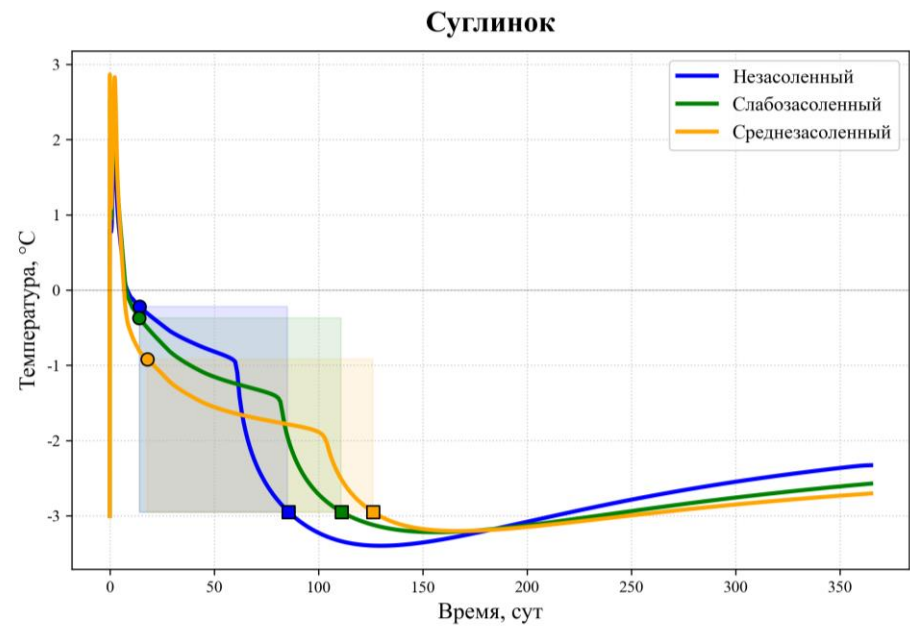
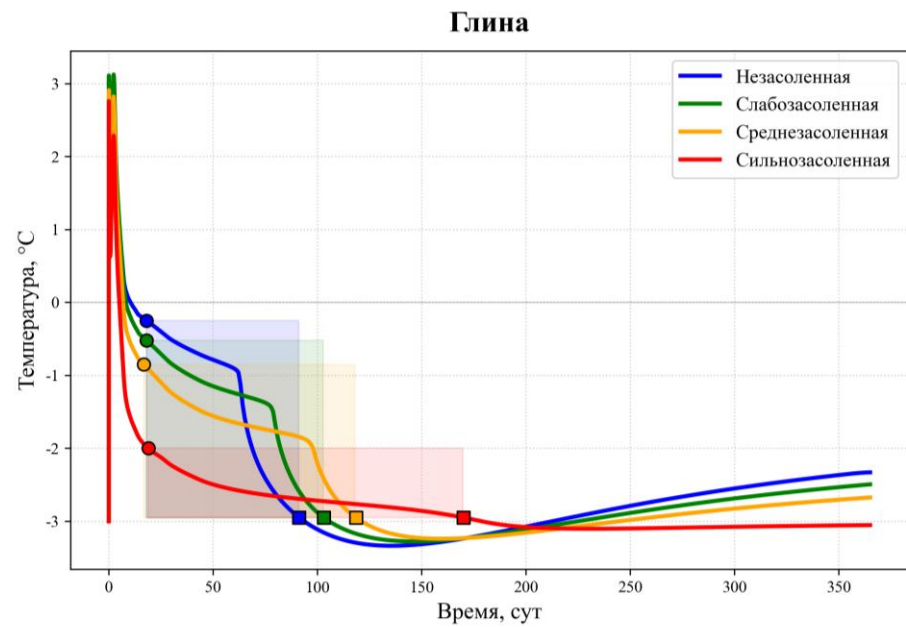


Рисунок 5 – Зависимость температуры на контакте «свайное основание – мерзлый массив» от времени для различных типов пород при различной засоленности: ○ – температура начала замерзания; □ – температура испытания на сдвиг по поверхности смерзания

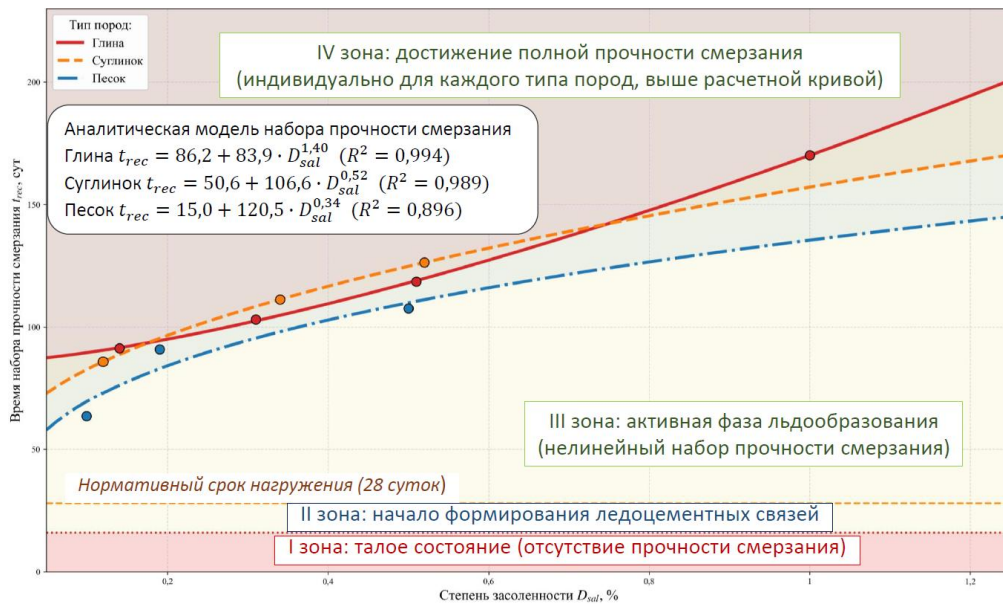


Рисунок 6 – Номограмма набора прочности смерзания свайных оснований с мерзлыми породами различной степени засоленности

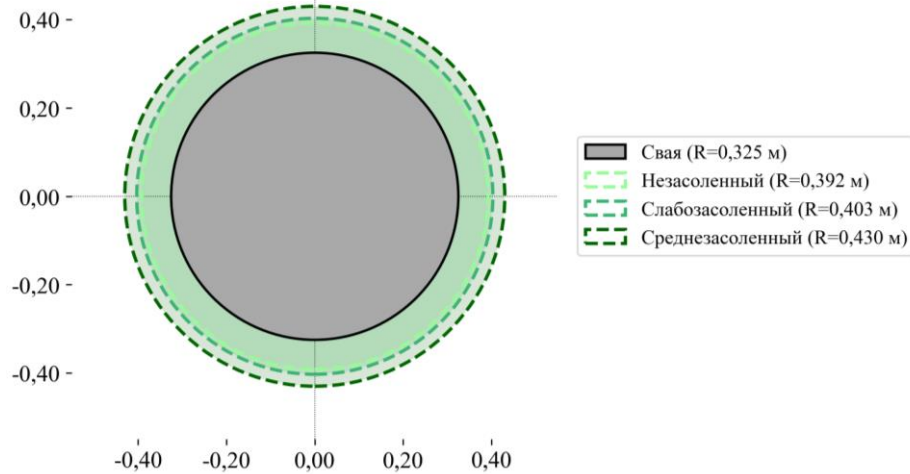


Рисунок 8 – Зависимость максимального радиуса растепления от степени засоленности для суглинков

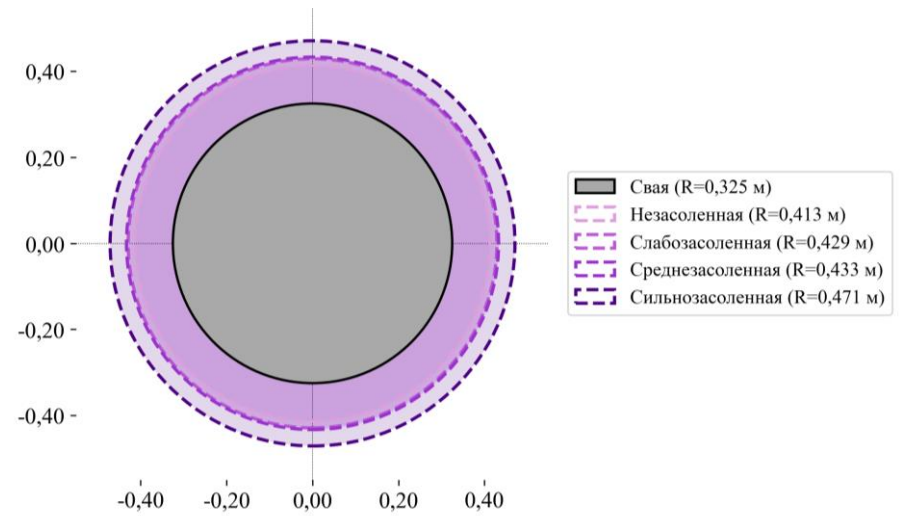


Рисунок 7 – Зависимость максимального радиуса растепления от степени засоленности для глин

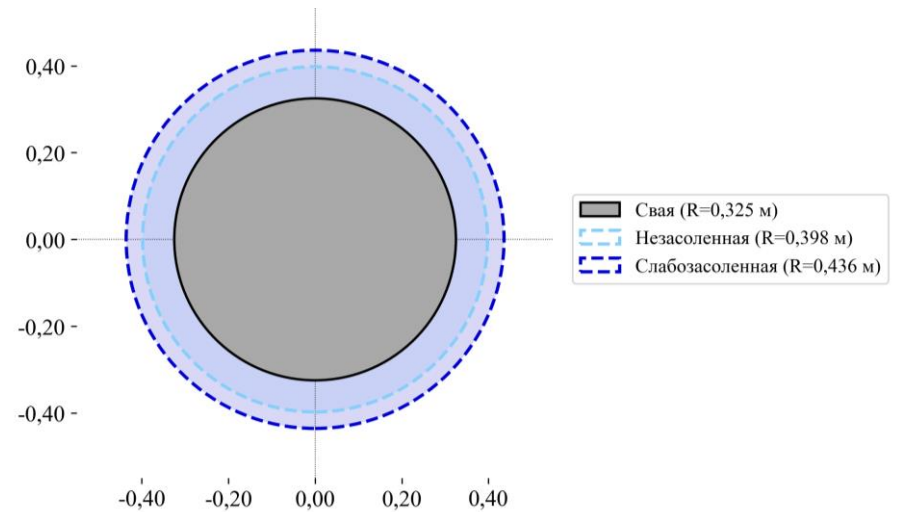


Рисунок 9 – Зависимость максимального радиуса растепления от степени засоленности для супесей

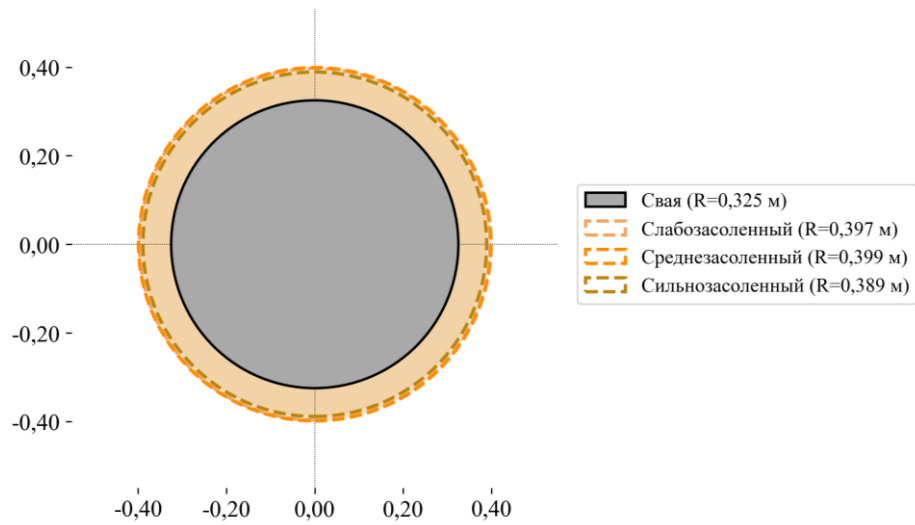


Рисунок 10 – Зависимость максимального радиуса растепления от степени засоленности для песков

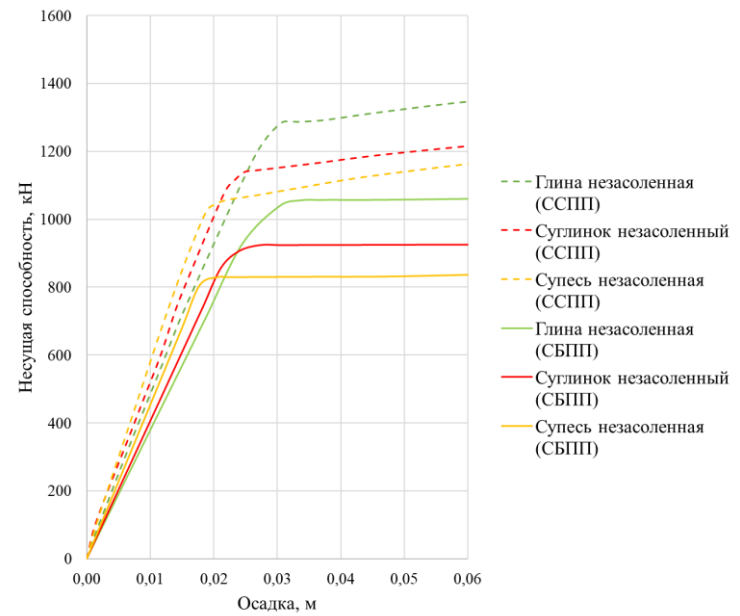


Рисунок 11 – Зависимости «несущая способность-осадка» для свай в незасоленных мерзлых породах: ССПП – для свай с пробкой-пятой, СБПП – для свай без пробки пяты

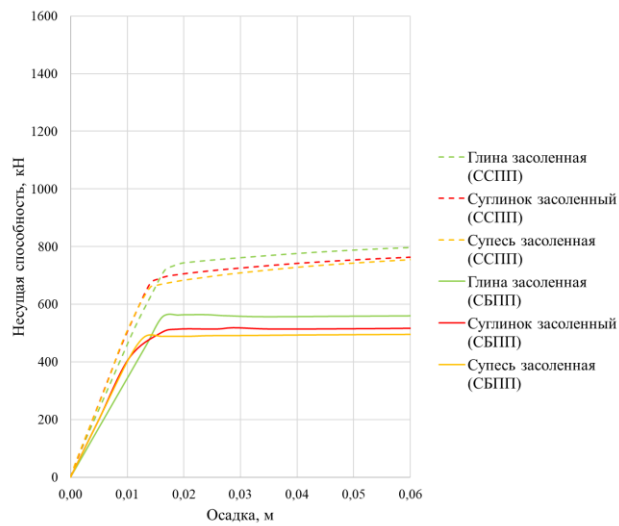


Рисунок 12 – Зависимости «несущая способность-осадка» для свай в засоленных мерзлых породах: ССПП – для свай с пробкой-пятой, СБПП – для свай без пробки пяты

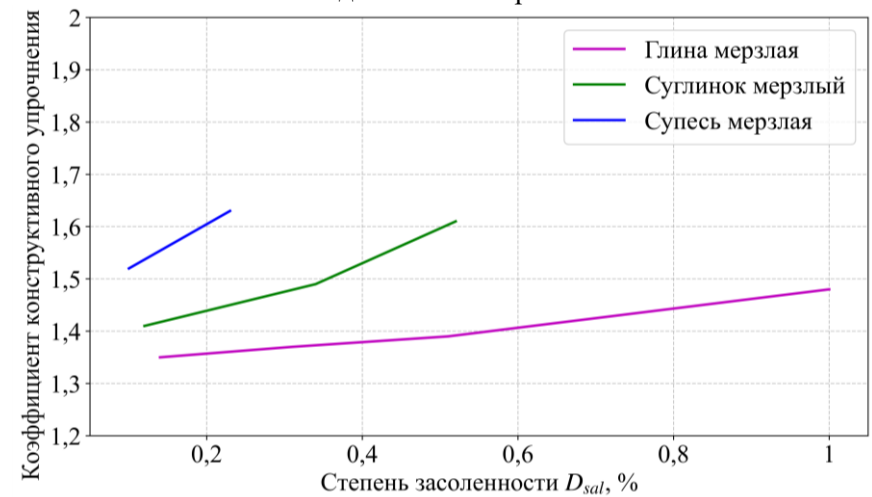


Рисунок 13 – Зависимость коэффициента конструктивного упрочнения  $k_{str}$  от степени засоленности многолетнемерзлых пород