

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Трушко В. Л.

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	10
1.1 Анализ способов возведения горнотехнических сооружений в криолитозоне	10
1.2 Особенности физико-механических свойств горных пород в условиях криолитозоны	16
1.3 Анализ методов расчета свайных оснований и моделирования геомеханического состояния грунтовых массивов в условиях криолитозоны и ледовых воздействий	26
1.4 Цель и задачи исследования.....	33
1.5 Выводы по главе 1	34
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД	36
2.1 Методика испытаний и определения деформационно-прочностных свойств грунтов и горных пород в условиях отрицательных температур.....	37
2.2 Исследование влияния физико-химических характеристик на теплофизические свойства дисперсных грунтов и пород.....	44
2.3 Закономерности изменения прочностных и деформационных свойств мерзлых пород и дисперсных грунтов	49
2.4 Выводы по главе 2.....	63
ГЛАВА 3 ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВАЙНЫХ ОСНОВАНИЙ С ГРУНТОВЫМ И ПОРОДНЫМ МАССИВОМ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ	65
3.1 Выбор и обоснование методики численного моделирования	65
3.2 остроение геомеханических моделей и задание граничных условий термомеханического взаимодействия	68
3.3 Анализ результатов моделирования и выявление закономерностей термомеханического взаимодействия свайных оснований с породным массивом	75
3.4 Выводы по главе 3	90
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙНЫХ ОСНОВАНИЙ	91
4.1 Разработка методики обоснования рациональных технологических параметров свайных оснований и оценки несущей способности	91
4.2 Разработка рекомендаций по повышению устойчивости и несущей способности свайных оснований в условиях криолитозоны и прибрежного шельфа	94
4.3 Эффективность практического применения разработанных рекомендаций.....	101

4.4 Техничко-экономическая эффективность практического применения разработанных рекомендаций	103
4.5 Выводы по главе 4.....	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	110
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации	124
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент	126

ВВЕДЕНИЕ

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 свай 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.

Соответствие паспорту специальности

Содержание работы соответствует паспорту научной специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» по 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 свай 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°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 (Приложение А).

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 α 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, 12-16 декабря 2022 г., Минск; Всероссийская конференция с международным участием «II Лавёровские чтения – Арктика: актуальные проблемы и вызовы» 13-17 ноября 2023 г., Архангельск; 16 Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» 23-27 октября 2023 г., Москва; XX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» 2-6 декабря 2024 г., Санкт-Петербург; Международный научный симпозиум «Неделя горняка» 3-7 февраля 2025 г., Москва; 17 Международная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» 27-31 октября 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 (пункты списка литературы №56, 57, 154, 155), 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 (Приложение Б, пункт списка литературы №41).

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 наименований. Работа изложена на 128 страницах машинописного текста, содержит 45 рисунков и 23 таблицы.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Анализ способов возведения горнотехнических сооружений в криолитозоне

Освоение территорий криолитозоны (Рисунок 1) для добычи природных ресурсов требует специальных подходов к строительству инженерных объектов, включая технологические платформы, ввиду экстремального климата и специфических свойств многолетнемерзлых пород (ММП).



Рисунок 1 – Карта распространения криолитозоны РФ [54]

В криолитозоне возводятся разнообразные горнотехнические сооружения. Для сооружений горнодобывающих предприятий (устья шахт, подземные выработки, надшахтные комплексы, отвалы) ключевыми проблемами являются обеспечение устойчивости пород в зоне теплового влияния, морозное пучение, деградация ММП под тепловыделяющими объектами и отвалами [28, 69, 96]. Эксплуатация таких объектов зачастую протекает в исключительно сложных горно-геологических условиях, осложненных наличием сильнольдистых пород и зон развития криопегов [27, 47, 107]. Породный массив зачастую отличается высокой структурной неоднородностью и сниженными прочностными характеристиками [33, 46, 56]. Возведение горнотехнических сооружений приводит к изменению НДС породного массива, повышая риск неравномерных осадков и потери несущей способности [6, 48, 70].

Фундаментальные принципы проектирования горнотехнических сооружений на ММП при освоении месторождений полезных ископаемых начали активно разрабатываться и научно обосновываться в первой половине XX века. Специфика возведения этих сооружений

определяется двумя основополагающими принципами строительства на ММП, впервые сформулированными Н.А. Цытовичем и развитыми в работах С.С. Вялова, П.И. Мельникова, Л.Н. Хрусталева и др [13, 38, 67]. Их труды, наряду с исследованиями других отечественных и зарубежных специалистов, заложили основу современного инженерного мерзлотоведения.

Согласно СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» [49], при строительстве на вечномерзлых породах применяется один из двух принципов: принцип I — вечномерзлые породы основания используются в мерзлом состоянии; принцип II — используются в оттаянном или оттаивающем состоянии.

Принцип сохранения вечномерзлого состояния пород основания как наиболее рациональный метод строительства зданий и сооружений, возводимых на вечномерзлых породах был разработан, внедрен и усовершенствован в СССР как на базе материалов отечественных инженерно-геокриологических изысканий (работы М.И. Сумгина, В.К. Яновского, П.А. Шумского, В.А. Кудрявцева, П.Ф. Швецова, И.Я. Баранова и др.), так и особенно – исследований по механике мерзлых грунтов (работы Н.А. Цытовича, Н.И. Салтыкова, Г.В. Порхаева, С.С. Вялова, П.И. Мельникова, Ю.Я. Велли, В.В. Докучаева и др.) [68]. Особое внимание уделялось разработке методов проходки шахтных стволов и других горнотехнических сооружений в ММП. Разрабатывались технологии крепления и термоизоляции устьев стволов для обеспечения устойчивости конструкций в условиях интенсивных нагрузок и изменений температурного режима пород, а также методы подготовки и стабилизации оснований технологических площадок, включая использование искусственных насыпей и термостабилизирующих устройств.

Как правило, при сплошном распространении мерзлых, а также при наличии льдонасыщенных и сильнольдистых пород целесообразно сохранять их мерзлое состояние и поддерживать отрицательные температуры в процессе всего срока эксплуатации зданий или сооружений [99]. При этом следует предусмотреть эффективные способы теплоизоляции возводимых сооружений [45], к ним относят устройство вентилируемых подполий или холодных первых этажей, применение теплоизолирующих отсыпок и конструкций, использование сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ) – термостабилизаторов, термосвай, ограничение теплового воздействия от самого сооружения (Рисунок 2).

Принцип возведения сооружений по методу допущения оттаивания был также предложен и обоснован отечественными учеными [68] для случая допущения осадок, оттаивания в процессе возведения и эксплуатации сооружений (работы Н.И. Салтыкова, Н.А. Цытовича, Г.И. Лапкина, В.П. Ушлакова и др.). Применяется для скальных и маловлажных крупнообломочных пород, не теряющих существенно несущую способность при оттаивании, либо когда сохранение мерзлоты экономически нецелесообразно. Может включать предварительное оттаивание и уплотнение грунтов, строительство сооружений, рассчитанных на восприятие осадок оттаивания,

мероприятия по инженерной подготовке территории (замена грунта, устройство дренажа). В этом случае управление состоянием массива направлено на контроль процесса оттаивания и стабилизацию осадок в допустимых пределах.

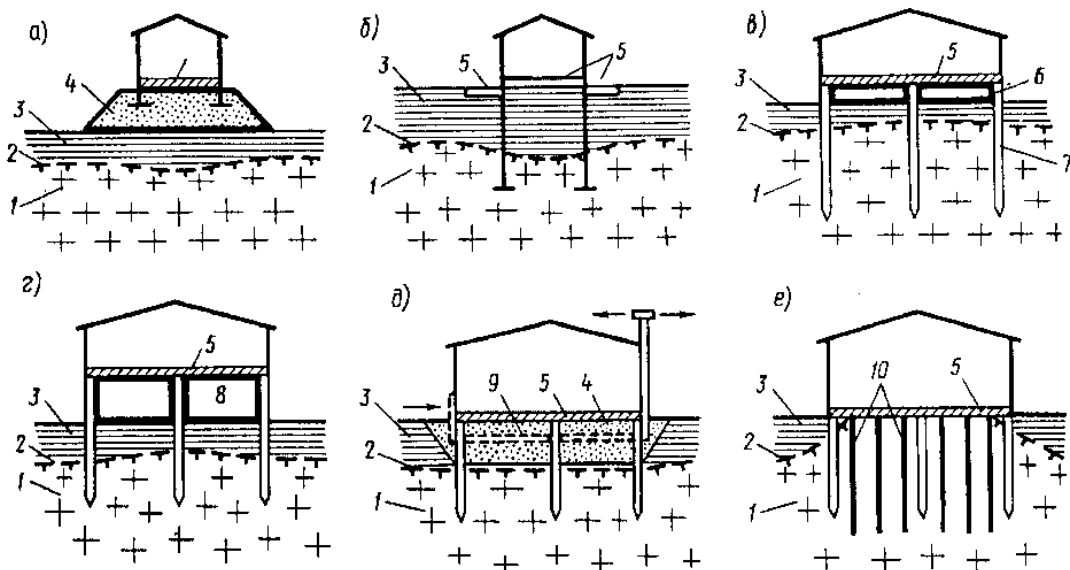


Рисунок 2 – Методы сохранения вечномерзлого состояния пород [58]:

1 – вечномерзлые породы; 2 – верхняя граница слоя вечномерзлых пород; 3 – деятельный слой; 4 – насыпной непучинистый грунт (пески средней крупности, крупные, крупнообломочные грунты, шлаки); 5 – теплоизоляция; 6 – вентилируемое подполье; 7 – сваи; 8 – неотапливаемый первый этаж; 9 – вентиляционные каналы; 10 – замораживающие колонки

Для технологических платформ, работающих по Принципу I, свайные основания являются наиболее распространенным и надежным решением, минимизирующим тепловое воздействие и обеспечивающим устойчивость. Их несущая способность определяется прочностью смерзания с ММП и сопротивлением под нижним концом, с учетом сил трения и морозного пучения [50]. Прочность смерзания зависит от температуры многолетнемерзлых пород (ММП), структуры горных пород, льдистости, шероховатости поверхности свай [160, 168] и солености поровой воды в ММП [85, 86].

К преимуществам свайных оснований можно отнести [151]:

– Адаптивность к различным инженерно-геологическим условиям. Существуют различные материалы и способы устройства свай (буроопускной, бурозабивной, опускной, бурообсадной и способ завинчивания в лидерные скважины), позволяющие выбрать оптимальный вариант для конкретных пород (Рисунок 3, 4). Выбор способа погружения свай зависит в основном от механических характеристик пород [49].

При наличии крупнообломочных включений трудоемкость бурения резко возрастает, а в некоторых случаях бурение практически невозможно. Предлагается способ возведения свай в криолитозоне под защитой буроопускной трубы с герметизацией пробкой-пятой [41].

Ребристые сваи отличаются большей устойчивостью в регионах распространения ММП [129] благодаря увеличенной площади поверхности, что повышает прочность смерзания. Металл в качестве материала сваи обладает минимальным воздействием на окружающую среду и высокой надежностью в условиях распространения ММП [147]. Использование железобетонных свай может привести к оттаиванию ММП вследствие выделения тепла в процессе гидратации цемента [115] при устройстве сваи. Это требует дополнительных затрат времени на восстановление несущей способности сваи.

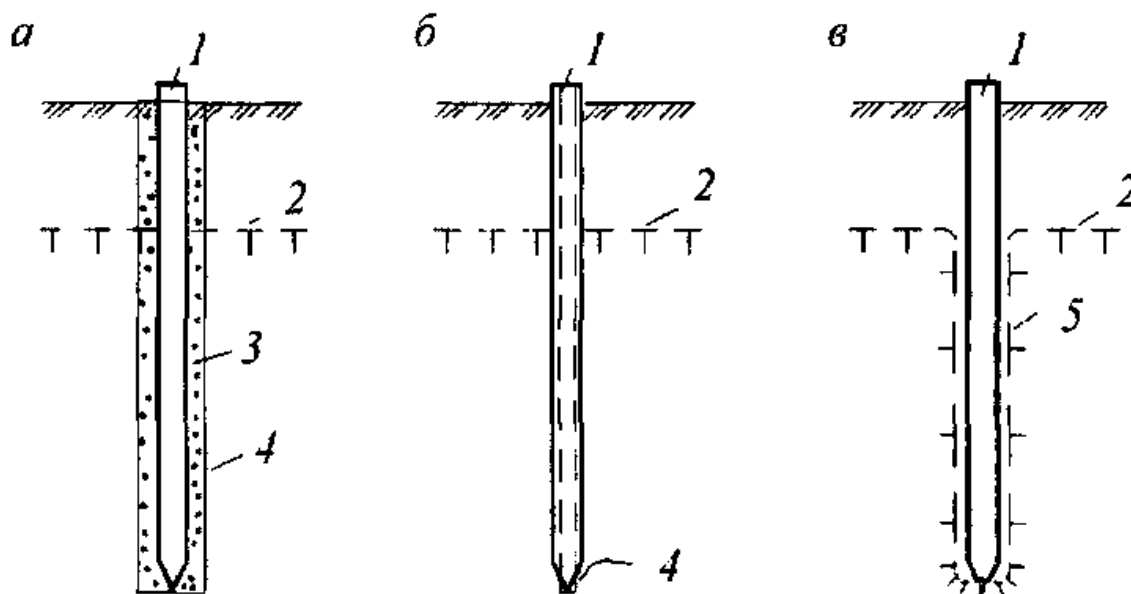


Рисунок 3 – Способы погружения свай [58]: *а* – буропускной, *б* – бурозабивной, *в* – опускной; 1 – свая, 2 – верхняя граница вечномерзлых пород, 3 – грунтовый раствор, 4 – стенка скважины, 5 – граница оттаивания вечномерзлых пород

При наличии слабых пород могут применяться комбинированные свайные основания [26], состоящие из свай увеличенной длины и диаметра в совокупности с применением технологии JetGrouting [91, 133]. В связи с высокими материальными затратами, технология JetGrouting чаще всего применяется при ликвидации аварий, например в случае термокаста.

– Минимизацию теплового воздействия на несущий слой. Свайные основания на вечной мерзлоте должны учитывать как механические свойства ММП, так и их тепловой режим [145]. Внесение тепла при установке свай может значительно изменить температурный режим окружающих пород [103], что влияет на устойчивость и эксплуатационные характеристики [76]. Для эффективного строительства в регионах вечной мерзлоты необходимо использовать материалы с низкой теплопроводностью вокруг свай, а также управлять свойствами пород для обеспечения оптимальных тепловых условий. При правильном проектировании (например использовании проветриваемого подполья) тепловое влияние от платформы на ММП сводится к минимуму.

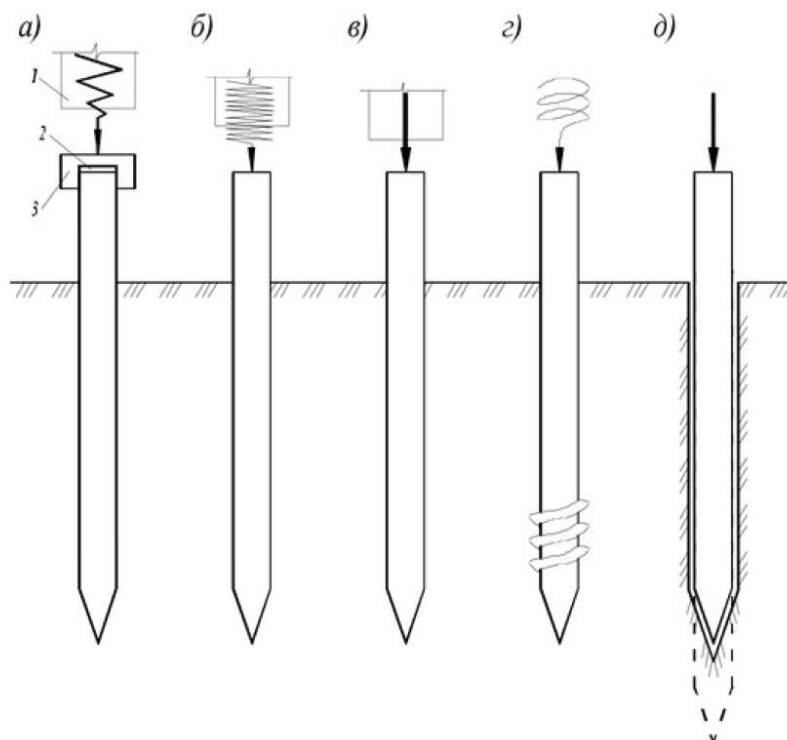


Рисунок 4 – Способы погружения свай заводского изготовления [10]: *а* – ударный, *б* – вибрационный, *в* – вдавливание, *г* – завинчивание, *д* – лидерные скважины

– Возможность интеграции с системами термостабилизации. Эффективными методами, обеспечивающими активное охлаждение прилегающих пород и повышение несущей способности, являются предварительное охлаждение, например с помощью термосифонов, тепловых катушек [114], и использование теплоизоляционных материалов или термоактивных свай (сваи с встроенными СОУ). Эксперименты [141] показали, что тепловые сваи эффективно передают тепло между стволом сваи и окружающими породами, существенно влияя на тепловой баланс и механические свойства пород.

Глубокое охлаждение по боковой поверхности сваи в совокупности с эффективной теплоизоляцией стабилизирует [132] температурный режим вокруг сваи, уменьшая сезонные колебания и увеличивая долговечность (Рисунок 5), что в свою очередь значительно повышает устойчивость и несущую способность свай по сравнению с поверхностными методами охлаждения.

– Устойчивость к силам морозного пучения. Прочность смерзания контактной поверхности между породами и свайным основанием является ключевой и сложной характеристикой при изучении процессов морозного пучения свай в арктических регионах [128]. Основными параметрами, влияющими на прочность по поверхности смерзания, считаются [120, 171] тип горной породы, температура, нормальное напряжение и шероховатость поверхности. При заглублении ниже глубины сезонного промерзания-оттаивания и применении специальных

мер (гладкая поверхность, противопучинистые смазки, обсыпки непучинистым грунтом) сваи эффективно сопротивляются выдергивающим усилиям [100].

кН · 10⁻¹

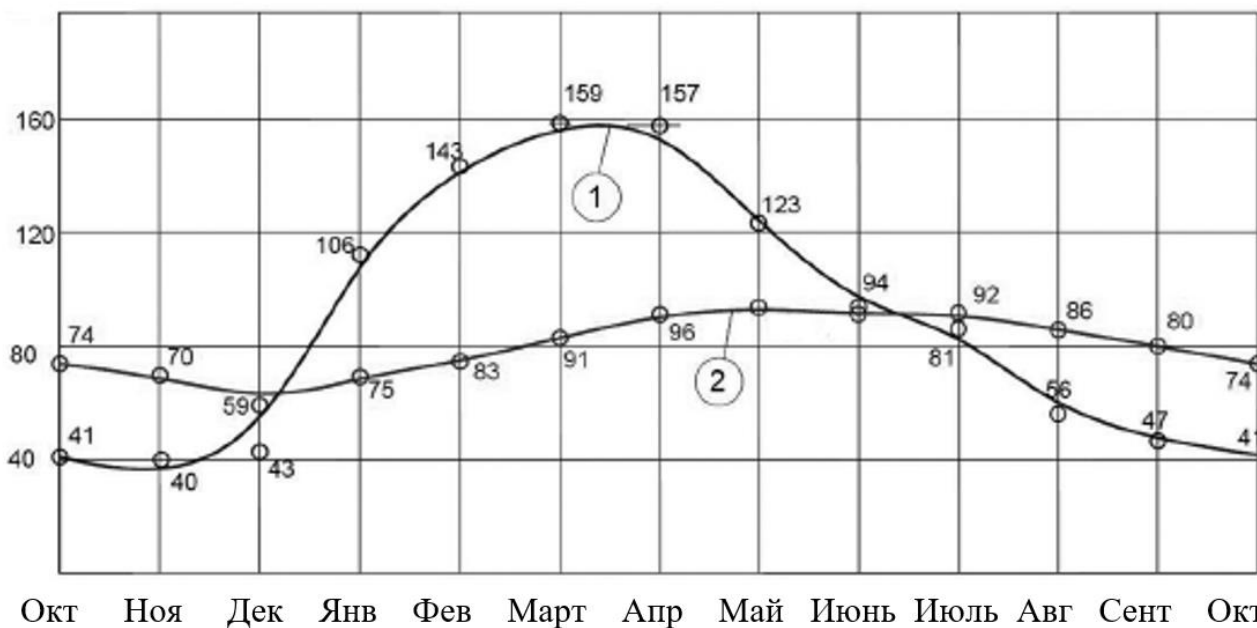


Рисунок 5 – Зависимость несущей способности сваи по боковой поверхности от времени года [132]: 1) поверхностное охлаждение; 2) боковое охлаждение и эффективная теплоизоляция

Недостатками применения свайных оснований являются относительно высокая стоимость и трудоемкость устройства, изменение свойств пород в прискважинной зоне в процессе бурения или устройства сваи [125] и необходимость точного учета реологических свойств мерзлых пород для обеспечения долгосрочной устойчивости.

Учитывая перечисленные факторы, для технологических платформ, свайные основания представляются наиболее перспективным и надежным решением. Они позволяют обеспечить требуемую несущую способность и минимизировать деформации сооружения в сложных условиях криолитозоны.

Для обеспечения надежности свайных оснований по Принципу I применяются методы управления состоянием ММП:

– *термические методы*: искусственное замораживание (временное упрочнение), термостабилизация грунтов основания (пассивные СОУ, активные системы), теплоизоляция.

– *механические и физико-механические методы*: уплотнение и замена грунта, армирование, сваи специальной конструкции.

– *физико-химические методы*: цементация, силикатизация (ограниченно в ММП), электрохимическое закрепление, контроль засоленности.

Для технологических платформ на свайных основаниях наиболее актуальными являются термические методы (термостабилизация для повышения и сохранения сил смерзания) и конструктивные решения самих свай и ростверков, обеспечивающие их оптимальную работу в мерзлом массиве. Изменения свойств ММП в результате воздействия механических и тепловых полей при технологических процессах, а также последующей эксплуатации платформы, должны тщательно прогнозироваться и учитываться при геомеханическом обосновании.

Анализ существующих подходов показывает, что, несмотря на значительный прогресс, выбор оптимальных параметров свайных оснований технологических платформ, обеспечивающих их надежную и экономичную эксплуатацию в разнообразных и изменяющихся условиях криолитозоны, остается сложной геомеханической задачей. Особую актуальность приобретает разработка и совершенствование методов прогнозирования взаимодействия свай с мерзлым породным массивом с учетом длительных процессов и комплексных воздействий.

Таким образом, особенности физико-механических свойств мерзлых пород являются основным фактором, влияющим на выбор способа сооружения свайного основания. Для более детального понимания механизмов взаимодействия свайных оснований с мерзлыми породами необходимо рассмотреть процессы, протекающие в криолитозоне.

1.2 Особенности физико-механических свойств горных пород в условиях криолитозоны

Изучение ММП и их уникальных физико-механических свойств имеет богатую историю, тесно связанную с освоением северных территорий. Исследованием физико-механических свойств мерзлых пород занимались такие отечественные ученые, как Пчелинцев А. М. 1964, Цытович Н. А. 1957, Вялов С. С., Мазуров Г. П. 1975, Ершов Э. Д. 1985, Савельев Б. А. 1985, Роман Л. Т. 1995, Хрусталева Л. Н. 2005, Емельянова Т. Я., Крамаренко В. В. 2010, Муравьев Ф. А. 2015, Невзоров А. Л., Кудрявцев С. А., Аксенов В. И., Р. Ш. Абжалимов и другие.

Выделяют пять периодов развития механики мерзлых грунтов [67]:

Первый период (до 1927 г.): начальные комплексные исследования ММП, включая дореволюционные исследования [29, 73]. основополагающий вклад внес М.И. Сумгин, чья монография [53] обобщила знания о распространении, формировании и свойствах ММП и заложила терминологическую базу. Из-за отсутствия экспериментальных данных прочность мерзлых пород приравнивалась к средней прочности на сжатие речного льда [4, 42].

Второй период (1927-1937 гг.): систематические экспериментальные исследования механических свойств ММП и льда. ММП рассматривались как однородное твердое тело [52]. Установлено наличие незамерзшей воды в мелкодисперсных породах при отрицательных температурах (П.И. Андрианов [3]; Н.А. Цытович и М.И. Сумгин [60]).

Третий период (1937-1947 гг.): формирование физических основ механики мерзлых грунтов. Н.А. Цытович [62, 64] сформулировал принцип равновесного состояния воды в мерзлых породах, подчеркнув влияние незамерзшей воды на их свойства.

Четвертый период (1947-1959 гг.): развитие методов прогноза и управления температурным режимом ММП, обобщение опыта строительства [65], акцент на важности исследования текучести ММП.

Пятый период (вторая половина XX в.): сформировались крупные отделы мерзлотоведения [6, 12, 27, 28, 33, 48, 69, 70, 96], опубликована монография Н.А. Цытовича «Механика мерзлых грунтов» [67], обобщившая многолетние исследования. Разработаны первые нормативные документы (СНиП II-18-76). Исследования Ю.М. Гончарова и Е.И. Гайдаенко [15] по свайным фундаментам вошли в СНиП 2.02.04-88, так же как и результаты экспериментального строительства с вентилируемым подпольем [16].

Современный этап характеризуется углубленным изучением роли незамерзшей воды, разработкой многокомпонентных и численных моделей. Из отечественных школ сегодня можно отметить исследования, проводимые на геологическом факультете МГУ им. Ломоносова (Л. Т. Роман и ее ученики), в институте мерзлотоведения РАН, г. Якутск, в Северном Архангельском федеральном университете (А. Л. Невзоров), Дальневосточном государственном университете путей сообщения (С. А. Кудрявцев), ОАО «Фундаментпроект» (В. И. Аксенов и другие), АО ТПИ «Омскгражданпроект» (р. Ш. Абжалимов).

Зарубежные исследования ММП также имеют свою историю, особенно в странах с обширными территориями, занятыми мерзлотой, таких как север Канады, Аляска (США) и Горный Китай. Исследования в Китае были начаты в 1960-х годах, а систематические исследования прочности и ползучести мерзлых пород начались в 1970-х [174]. К настоящему времени в Китае возникло несколько научных школ, которые изучают различные аспекты ММП [127, 159]. Известно несколько полных обзоров и изданных монографий, в которых приведены результаты ретроспективного анализа истории развития механики ММП в Китае за последние десятилетия [126, 135, 162].

Мерзлые породы являются сложной четырехфазной системой (Рисунок 6), в них помимо твердых минеральных частиц всегда содержится лед как породообразующий минерал и то или иное количество незамерзшей воды и газов. Все четыре компонента в ММП находятся во взаимодействии друг с другом и в зависимости от изменения внешних воздействий характеризуют механическое поведение.

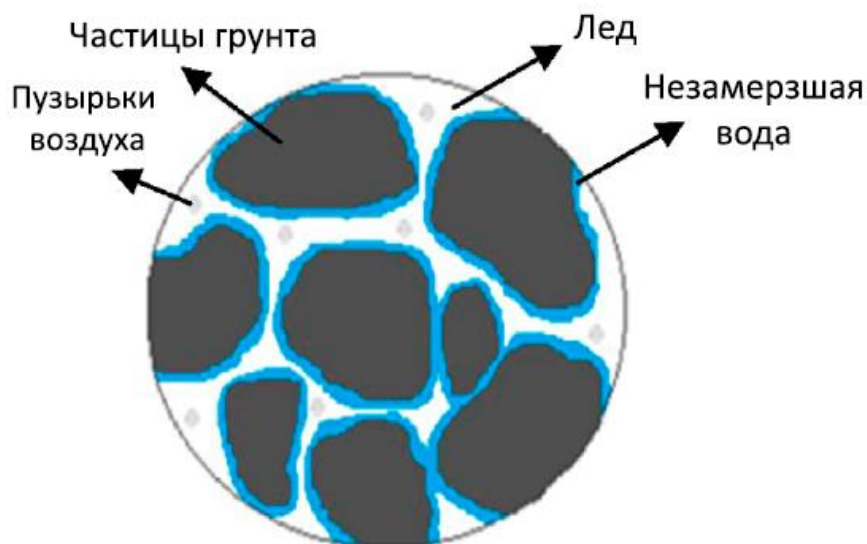


Рисунок 6 – Состав мерзлых пород [106]

Твердые минеральные частицы мерзлых пород оказывают существенное влияние на их свойства, которые зависят как от размеров и формы минеральных частиц, так и от физико-химической природы их поверхности, определяемой минералогическим составом частиц и составом поглощенных ими катионов.

Лед в отличие от минеральных частиц ММП представляет собой мономинеральную породу со свойствами резко отличными от других горных пород. Изменения термодинамических условий существенно влияет на изменение свойств льда и, как следствие, характеризуют нестабильность свойств ММП при любом изменении внешних условий.

В мерзлых породах при отрицательных температурах (вплоть до -70°C) всегда содержится вода в жидкой фазе, которая может находиться в прочносвязанном и рыхлосвязанном состояниях. Количество незамерзшей воды в ММП уменьшается с понижением отрицательной температуры породы, причем каждая порода характеризуется вполне определенной кривой содержания незамерзшей воды. Присутствие незамерзшей воды в порах мерзлой породы уменьшает содержание чистого льда и приводит к более пластичному поведению при деформировании. При малом содержании льда, в особенности в глинистых мелкозернистых породах, пленки незамерзшей воды оказывают значительное влияние на механические свойства ММП [65, 66, 105].

Роль газов в ММП сводится к образованию пористости и в некоторых случаях к увеличению упругости.

Таким образом, в зависимости от температуры, породы в криолитозоне могут находиться в мерзлом, талом, охлажденном, морозном и сыпучемерзлом состояниях (Таблица 1).

Таблица 1 – Классификация незасоленных мерзлых пород по температуре [24]

Разновидность пород	Температура пород T , °C
Немерзлый (талый)	$T \geq 0$
Охлажденный	$0 > T \geq T_{bf}$
Мерзлый	$T < T_{bf}$
Морозный (для скальных пород)	$T < 0$
Сыпучемерзлый (для дисперсных пород)*	$T < 0$
*Для пород с суммарной влажностью $\leq 0,03$ д.е. Примечание: T_{bf} – температура начала замерзания	

В зависимости от времени существования ММП классифицируют следующим образом (Таблица 2)

Таблица 2 – Классификация мерзлых пород в зависимости от времени их существования [24]

Наименование	Время существования
Вечномерзлые	Века и тысячелетия
Многолетнемерзлые	От нескольких лет (но не менее трех) до нескольких тысячелетий
Сезонномерзлые	От 1 до 2 сезонов
Кратковременномерзлые	От нескольких часов до нескольких суток (не регулярно возникающие)

Кроме того, по физическому состоянию различают твердомерзлые, пластичномерзлые и сыпучемерзлые породы (Таблица 3) в зависимости от их состава, температуры и степени влажности с учетом сжимаемости под нагрузкой [24].

Таблица 3 – Классификация незасоленных мерзлых пород по состоянию [24]

Породы	Разновидность породы		
	Твердомерзлый ($m_f \leq 0,01$ МПа ⁻¹) при $T < T_h$, °C	Пластично-мерзлый ($m_f > 0,01$ МПа ⁻¹) при T , °C	Сыпучемерзлый при $T < 0$ °C
Скальные и полускальные	$T_h = 0$	-	-
Крупнообломочные	$T_h = 0$	$T_h < T < T_{bf}$ при $S_{rf} < 0,8$	При $S_{rf} \leq 0,15$
Пески гравелистые, крупные и средней крупности	$T_h = -0,1$		
Пески мелкие и пылеватые	$T_h = -0,3$		
Глинистые: - супесь - суглинок - глина	$T_h = -0,6$ $T_h = -1,0$ $T_h = -1,5$	$T_h < T < T_{bf}$	При $S_{rf} \leq 0,15$
Примечание: T_h – температурная граница твердомерзлого состояния породы; T – температура породы; S_{rf} – степень заполнения пор льдом и незамерзшей водой.			

Однако, ряд авторов [43, 44] отмечает, что это разделение не соответствует реальным границам между пластичномерзлым и твердомерзлым состоянием пород и предлагает внести в нормативные документы требование обязательного расчета оснований по двум группам

предельных состояний, за исключением случаев, обоснованных прямыми экспериментальными исследованиями.

Ключевыми физическими свойствами ММП являются температура, плотность, льдистость и теплофизические характеристики. Эти свойства тесно взаимосвязаны и зависят от состава ММП, их криогенного строения и внешних термодинамических условий.

Механическое поведение ММП характеризуется комплексом свойств, которые существенно отличаются от свойств талых грунтов из-за наличия льда и незамерзшей воды, а также их взаимодействия с минеральным скелетом. Отмечается [106], что влияние на механическое поведение ММП имеют как физическое состояние породы (вид, льдистость, влажность, содержание незамерзшей воды, плотность в сухом состоянии, засоленность), так и факторы, обусловленные внешним воздействием (температура, скорость нагружения, длительность действия нагрузки, всестороннее давление). Влияние этих факторов не является независимым [12], и при учете всех возможных комбинаций их взаимного влияния вызывает трудности.

Одной из главных особенностей прочностного и деформационного поведения ММП является его ярко выраженная температурная зависимость. Многочисленные исследования показывают, что температура является одним из первостепенных факторов, влияющих на физическое и механическое поведение ММП [60, 63, 67]. С понижением температуры количество незамерзшей воды в порах уменьшается, что приводит к значительному росту прочностных характеристик мерзлых пород, а также сил смерзания с материалом сваи. Одновременно увеличиваются и модули деформации, то есть ММП становятся более жесткими и менее сжимаемыми. [61, 63].

В мерзлом состоянии порода является достаточно прочным и устойчивым основанием. Однако при повышении и понижении температуры (даже в области отрицательных значений температур) происходят существенные изменения свойств ММП [67], что обуславливает нестабильность их свойств; при оттаивании же порового льда структурные льдо-цементные связи лавинно разрушаются и возникают значительные деформации.

С повышением температуры прочность и модуль деформации ММП снижаются, что приводит к снижению несущей способности и увеличению сжимаемости. Исследование также показывает, что содержание незамерзшей воды увеличивается с повышением температуры породы, способствуя увеличению водопроницаемости. Увеличение содержания незамерзшей воды также является основной причиной снижения прочности при деградации вечной мерзлоты [119]. Влияние общей влажности на каждое свойство также существенно различается для разных типов пород. Другие факторы, такие как размер зерен, относительная плотность, соленость и

механизмы льдообразования, также влияют на изменение свойств в зависимости от температуры [119].

Характер разрушения ММП также зависит от температуры: при более низких температурах они склонны к хрупкому разрушению, тогда как при температурах, близких к точке плавления льда (особенно для засоленных пород), они проявляют более пластичные свойства.

Льдистость и криогенная текстура определяют степень цементации минерального скелета льдом, анизотропию свойств и поведение пород при оттаивании. Высокая льдистость может привести к тому, что свойства ММП будут приближаться к свойствам чистого льда. В породах с большим содержанием льда механическое поведение близко к поведению льда [13, 65, 79, 95]. Прочность ледяной матрицы почти пропорциональна объемному содержанию льда [138]. Максимальное сжимающее напряжение водонасыщенного мерзлого торфа при компрессионных испытаниях возрастает с увеличением удельного объема льда [138]. График зависимости максимального напряжения от удельного объема льда наглядно показывает, что прочность увеличивается с ростом удельного объема льда (Рисунок 7).

Таким образом, прочность ММП можно рассматривать как сочетание сцепления ледяной матрицы и сопротивления трению зерен породы и трещиноватых кристаллов льда.

Содержание незамерзшей воды, сохраняющейся в ММП при отрицательных температурах, играет важную роль. Пленки незамерзшей воды обеспечивают миграцию влаги, участвуют в процессах льдообразования и морозного пучения, а в механическом отношении способствуют пластичности и ползучести, особенно при температурах, близких к 0°C , и в дисперсных породах [13, 67].

Состав и дисперсность минерального скелета, а также количество незамерзшей воды влияют на деформационное поведение ММП. В образцах с малой влажностью преобладают деформации за счет структурных преобразований (деформации сжатия), а в переувлажненных образцах – деформации за счет фазовых переходов воды (деформации расширения) [12]. Численные значения предельно длительных деформаций сжатия предварительно замороженных пород и продолжительность их деформирования определяются влажностью и степенью дисперсности [12], возрастая с понижением влажности (до определенного предела) и повышением дисперсности породы. Температурные деформации ММП возрастают во времени тем интенсивнее, чем меньше их влажность и чем выше область изменения температуры [12]. Промерзание, как правило, сопровождается пучением только тогда, когда породы в достаточной степени водонасыщены или пересыщены. Глинистые породы с влажностью ниже верхнего предела пластичности (предела текучести) в процессе замерзания часто показывают не увеличение, а уменьшение объема [12].

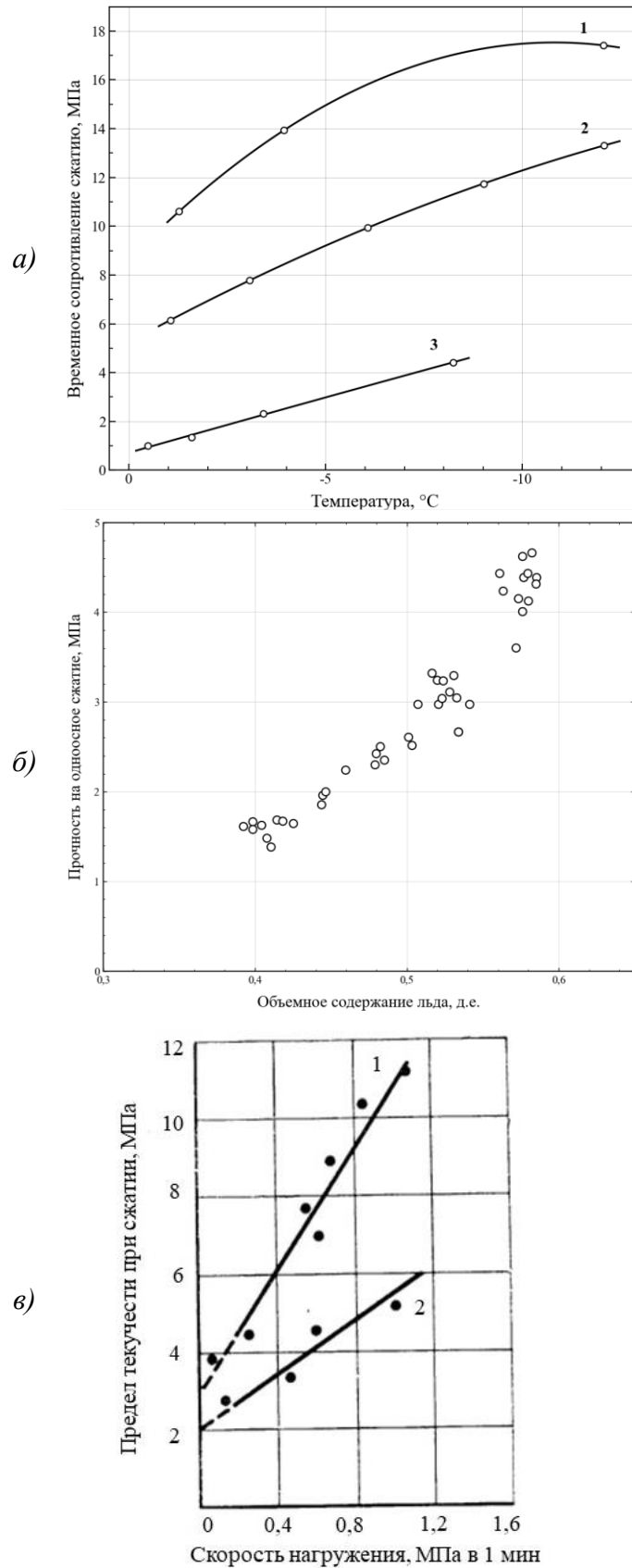


Рисунок 7 – Зависимость временного сопротивления сжатию ММП от температуры: 1 – песок; 2 – суглинок; 3 – глина [67]; б – Зависимость между сжимающим напряжением и объемом льда на единицу объема пород [138]; в – Зависимость предела текучести ММП при сжатии от скорости приложения нагрузки: 1 – песок при $T = -20^{\circ}\text{C}$, $W_c = 17\%$; 2 – глина при $T = -20^{\circ}\text{C}$, $W_c = 32\%$ [67]

Испытания на прямой сдвиг [59, 164] или трехосные испытания [110, 112, 157] указывают на зависимость результатов от фазового состава ММП. Хотя фазовый состав (частицы, лед, незамерзающая вода и воздух) известен, их индивидуальный вклад в общий процесс обсуждается десятилетиями [78, 108, 137, 152]. Проблема заключается в том, что состав ММП и, как следствие, прочность и деформируемость изменяются со временем в зависимости от температуры и напряжений [67, 71, 136, 146, 161].

На процесс разрушения также влияют микроструктурные изменения, такие как образование кристаллов льда и перестройка частиц. Так, хрупкое разрушение мерзлых глинистых пород в основном вызвано дроблением и связным разрушением частиц породы. Пластическое разрушение в основном происходит в результате уплотнения частиц скелета при низком содержании воды и разрушения под давлением и таяния порового льда при высоком содержании влаги [149].

Наиболее специфической чертой деформационного процесса ММП является их ползучесть – способность к медленному, непрерывному пластическому течению во времени. Это явление обусловлено вязкопластичным характером льда и наличием пленок незамерзшей воды. Следствием ползучести является снижение прочности ММП во времени [14], поэтому необходимо ориентироваться на длительную прочность.

Оценка прочности и ползучести ММП эффективно осуществляется методом трехосного сжатия [81]. Экспериментальные данные позволили математически описать термомеханические процессы в льдонасыщенных породах [81], особенности ползучести высокотемпературных суглинков [118], а также эффекты разупрочнения на сдвиг [165]. Наряду с этим, в литературе подробно исследованы стадии неустановившейся и вторичной ползучести, включая релаксацию напряжений льдистых пород [88, 89].

Деформационные свойства пород тесно связаны с фазовым составом влаги: понижение температуры и рост давления оказывают противоположное влияние на количество незамерзшей воды и, как следствие, на модуль деформации [163].

Механические свойства ММП зависят от сезонных колебаний температуры, которые проявляются в виде циклов замораживания-оттаивания. Этот процесс связан с непрерывным изменением количества содержания льда и незамерзшей воды, а значит напрямую влияет на изменение прочностных и деформационных свойств пород.

В результате обзора литературных источников можно выделить следующие выводы о влиянии циклического замораживания-оттаивания на механические свойства ММП [5, 163]:

1. Пористость возрастает для плотных пород и уменьшается для рыхлых.

2. Проницаемость оттаявших пород возрастает с увеличением числа циклов, что связано с образованием микротрещин. Дополнительное внешнее давление оказывает решающее воздействие.

3. Прочность ММП зависит от числа циклов; породы в мерзлом состоянии деформируются с упрочнением и последующим разупрочнением, в оттаявшем – без разупрочнения.

4. Сжимаемость ММП возрастает с увеличением количества циклов, изменения объема могут достигать 30% и более после оттаивания.

5. Упругий модуль деформации и недренированная прочность зависят от степени предварительного уплотнения (OCR) и числа циклов; уменьшение модуля упругости может составлять 25-60%.

6. Удельное сцепление уменьшается с увеличением количества циклов, составляя от трети до половины величины сцепления для немерзлых пород. Угол внутреннего трения с ростом числа циклов изменяется незначительно.

Существует понятие критического цикла замораживания-оттаивания, при котором обнаруживаются существенные изменения в прочностных параметрах ММП [72]. Авторы [172] предложили эмпирический метод прогнозирования длительной прочности на основании зависимости между циклами и временем. Известно [150] пороговое значение в циклах, после которого прочность на сдвиг значительно снижается. Что касается параметров прочности Мора-Кулона, угол внутреннего трения в целом показывает сложные вариации с замораживанием-оттаиванием, но изменяется в узком диапазоне для широкой разновидности пород, тогда как сцепление показывает существенные изменения. Подтверждено наличие критического коэффициента пористости (или критической плотности в сухом состоянии) и критического цикла [135].

Прочность породы на сдвиг после циклов замораживания-оттаивания в целом уменьшается, а изменение зависит от внутренних факторов (наличие незамерзшей воды [59, 71], скорость замораживания [90]) и внешних (давление предварительного уплотнения [131], размер частиц и содержание мелкозернистой фракции [123, 170]). Отмечается наличие критического коэффициента пористости [156] или критической плотности породы в сухом состоянии [135], при которых изменения свойств незначительны. Для пород с более низким коэффициентом пористости или более высокой плотностью прочность на сдвиг значительно снижается после циклов, затем стабилизируется. Также подтверждается эффект консолидации «памяти» (давления предварительного уплотнения) переуплотненных пород, который исчезает после промерзания-оттаивания. Существует концепция накопленной свободной энергии [135, 167],

основанная на конкретном двунаправленном изменении прочности породы после замораживания-оттаивания.

Вышеупомянутые работы в основном касались незасоленных ММП. В засоленных породах существенными факторами являются температура замерзания, концентрация солевого раствора, процесс миграции воды и соли и другие [7, 67]. Отмечается [74], что засоленность снижает связную прочность ММП и увеличивает их сжимаемость. Выявлено, что сцепление уменьшается, в то время как угол внутреннего трения увеличивается с повышением солености для глин и супесей (Рисунок 8). Для песков же оба параметра уменьшаются с увеличением солености. Сцепление уменьшается быстрее с повышением температуры в засоленных породах по сравнению с незасоленными. Соленость оказывает более существенное влияние на параметры прочности ММП, чем температура.

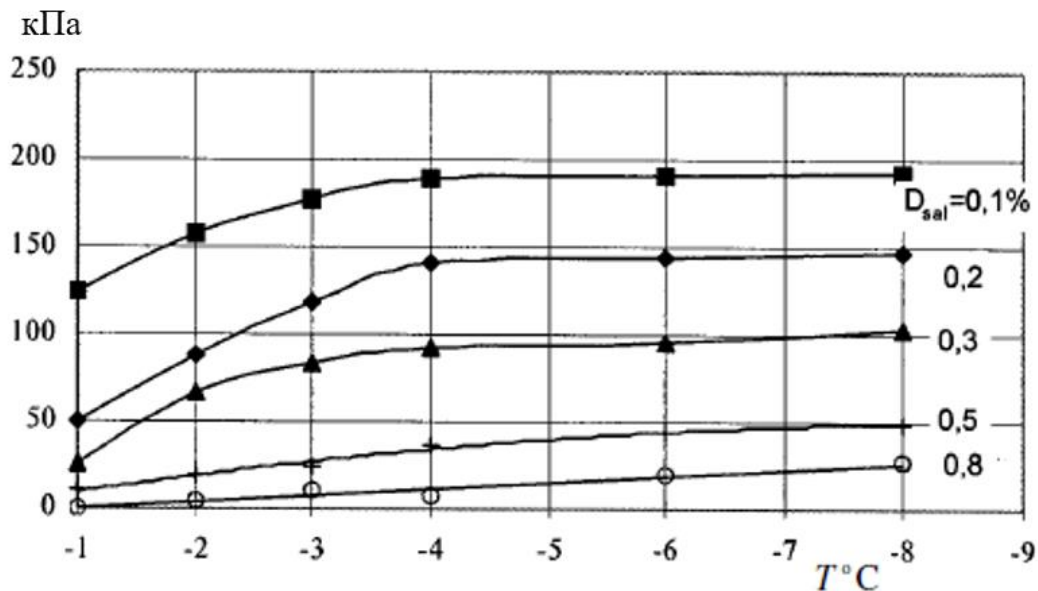


Рисунок 8 – Зависимость сцепления от температуры для супеси ($W = 28\%$) [74]

Для всех видов мерзлых пород известны некоторые общие закономерности изменений показателей прочности [8, 9]:

1. Увеличение прочности при понижении температуры (увеличение сцепления из-за цементации льдом).
2. Увеличение прочности при уменьшении степени дисперсности пород, связанное с сокращением количества незамерзшей воды.
3. Увеличение прочности при возрастании относительной льдистости до полного насыщения пор льдом и уменьшение прочности при дальнейшем увеличении льдистости, связанное с проявлением пластических свойств льда.
4. Уменьшение прочности при увеличении длительности приложения нагрузки.

5. В породах слоистой и сетчатой текстуры увеличение сопротивления быстро действующим нагрузкам и уменьшение сопротивления продолжительным нагрузкам с ростом числа ледяных включений.

6. Зависимость прочности от степени засоленности (уменьшение прочности с увеличением засоленности, повышенная деформированность).

Механические свойства пород значительно изменяются между мерзлым и талым состояниями под влиянием таких факторов, как температура, содержание влаги, размер частиц и напряжения [163]. Модуль упругости значительно увеличивается при переходе породы из незамерзшего в мерзлое состояние. Сила цементирования льда, определяемая как разница в параметрах прочности между мерзлым и талым состояниями, значительна и увеличивается в зависимости от степени уплотнения.

Как показывает опыт проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений, их надежность обеспечивается только при правильном учете особенностей физико-механических свойств ММП, теплового и механического взаимодействия системы «свайное основание-ММП», а также при соблюдении в строительный и эксплуатационный периоды технических требований проекта. Растепление мерзлых пород приводит к потере сплошности и структуры, снижает прочностные свойства пород, а также вызывает неравномерные осадки. Деформации ММП, возникающие из-за собственного веса или в результате строительных работ и установки оборудования, могут превысить допустимые значения для свай. Это приводит к перегрузке, повреждению и возникновению кренов, которые в итоге могут стать причиной частичной или полной потери устойчивости сооружений.

Для полного понимания геомеханического поведения свайного основания необходимо проанализировать существующие геомеханические модели мерзлых пород. Понимание этих специфических особенностей механического поведения ММП и их зависимостей от различных факторов является основой для разработки адекватных геомеханических моделей и методов расчета, направленных на обеспечение устойчивости и надежности сооружений в сложных условиях криолитозоны.

1.3 Анализ методов расчета свайных оснований и моделирования геомеханического состояния грунтовых массивов в условиях криолитозоны и ледовых воздействий

1.3.1 Методы расчета напряженно-деформированного состояния

Эмпирическими методами несущая способность свай, работающей в мерзлых грунтах по Принципу I, определяется как сумма сопротивлений мерзлого грунта под нижним концом свай и

по ее боковой поверхности смерзания. Формула для расчета несущей способности основания вертикально нагруженной висячей сваи F_u , кН, согласно СП 25.13330.2020 (1), имеет вид [49]:

$$F_u = \gamma_t \gamma_c \left(RA + \sum_{i=1}^n R_{af,i} A_{af,i} \right), \quad (1)$$

где γ_t – температурный коэффициент, учитывающий изменения температуры грунтов основания из-за случайных изменений температуры наружного воздуха, определяется по приложению П [49];

γ_c – коэффициент условий работы основания, принимаемый по указаниям п. 7.2.4 СП 25.13330.2020 [49];

R – расчетное сопротивление мерзлого грунта под нижним концом сваи, кПа, определяемое согласно указаниям п. 7.2.3 СП 25.13330.2020;

A – площадь опирания сваи на грунт (площадь поперечного сечения сваи или ее уширения), м²;

$R_{af,i}$ – расчетное сопротивление мерзлого грунта или грунтового раствора сдвигу по боковой поверхности смерзания сваи в пределах i -го слоя грунта, кПа, определяемое согласно указаниям п. 7.2.3 СП 25.13330.2020 [49];

$A_{af,i}$ – площадь поверхности смерзания i -го слоя грунта с боковой поверхностью сваи, м²;

n – число выделенных при расчете слоев многолетнемерзлого грунта.

Расчетные значения R и $R_{af,i}$ зависят от вида и состояния мерзлого грунта (песчаные, глинистые, крупнообломочные), его температуры, льдистости и засоленности [2].

Развитие численных методов расчета НДС мерзлых пород неразрывно связано с расширением инженерного освоения криолитозоны и необходимостью прогнозирования поведения ММП в условиях климатических изменений. Как показывает анализ современной научной литературы, развитие расчетных подходов шло от классических аналитических решений, заложенных фундаментальной школой Н. А. Цытовича и С. С. Вялова, к комплексным численным методам на базе метода конечных элементов и метода конечных разностей.

1.3.2 Обзор современных геомеханических моделей ММП

В последние годы значительное внимание уделяется разработке универсальных геомеханических моделей, способных описывать поведение как мерзлых, так и оттаивающих пород. Классификация таких моделей [173] включает эмпирические и термодинамические модели, обобщенные модели пластичности, модели термопоромеханики и модели, основанные на теории повреждений, гомогенизации и граничных поверхностей. Для оценки последствий оттаивания зачастую применяется аналитическая модель, рассматривающая грунт как полностью оттаявший [49, 67]. При этом расчет температурного поля пород, являющийся отдельной

теплофизической задачей, базируется на уравнениях Фурье и Стефана [30]. Ниже представлены современные геомеханические модели, применимые для описания поведения ММП.

1.3.3 Геомеханические модели, учитывающие реологические свойства ММП

Для математического описания ползучести ММП применяются механические (Рисунок 9), микроскопические и феноменологические модели деформирования пород. Последние распространены шире из-за сложности лабораторного определения микропараметров [75]. Базовые параметры длительной прочности традиционно определяются классическим ступенчатым нагружением до разрушения [13, 67], однако более перспективным является неразрушающий метод контролируемых деформаций С. С. Вялова [13].

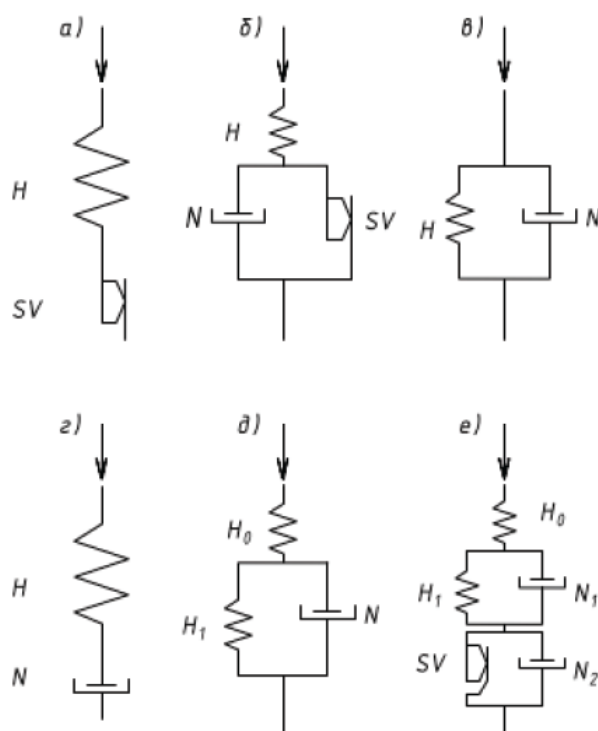


Рисунок 9 – Механические реологические модели: а) Прандля; б) Бингама; в) Кельвина-Фойгта; г) Максвелла; д) Хохэнмэзера–Прагера; е) Вялова [36]

Современные исследования направлены на создание моделей, описывающих все три стадии ползучести, включая прогрессирующую. Так, переход к стадии прогрессирующего течения эффективно описывается моделью [165], учитывающей непрерывное снижение сцепления при неизменном угле внутреннего трения.

В рамках теории гомогенизации предложена модель [158], в которой полный цикл ползучести (Рисунок 10) рассматривается как сумма деформаций «связанных элементов» (с прочным льдоцементом) и «элементов трения» (со слабым льдом или без него) (Рисунок 11).

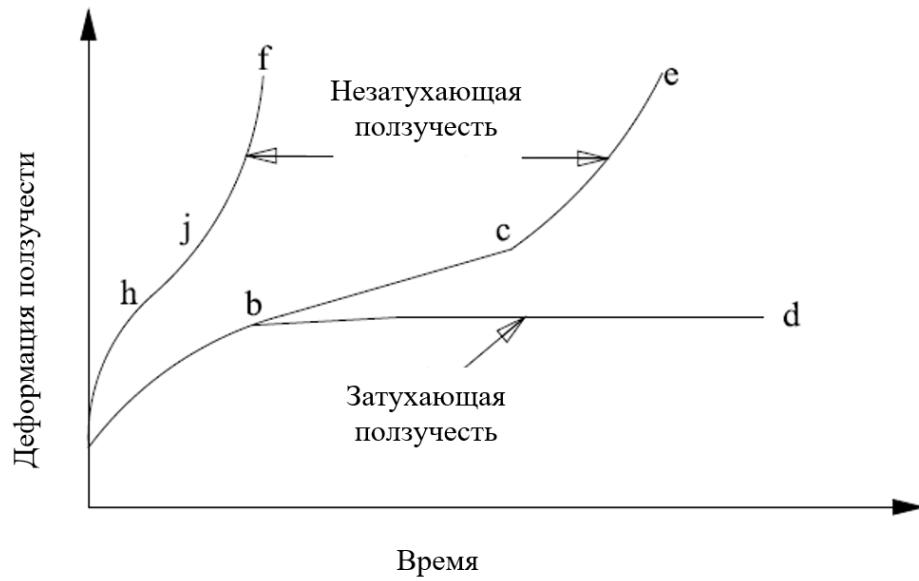


Рисунок 10 – Классические кривые ползучести мерзлых пород [158]

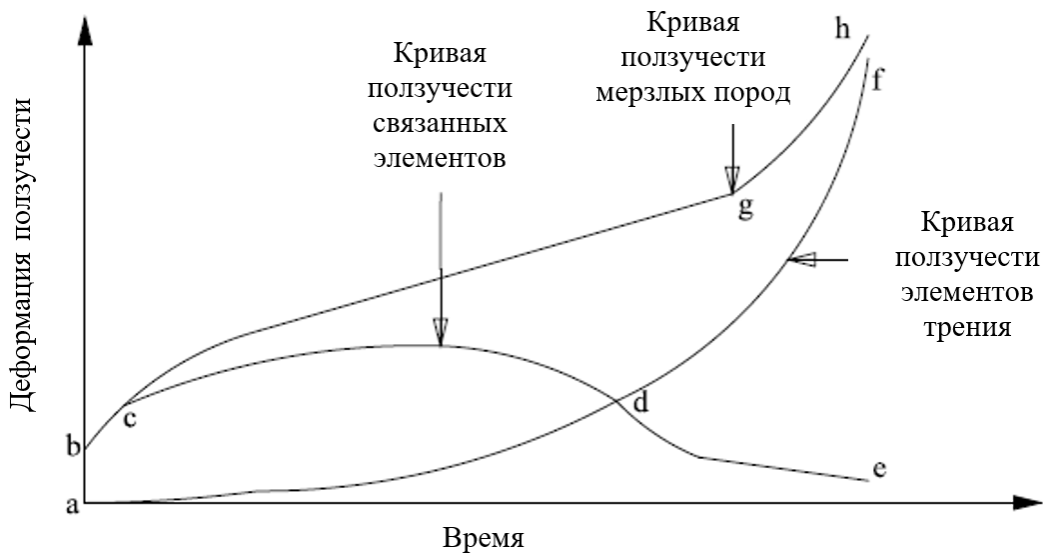


Рисунок 11 – Кривые ползучести для связанных элементов, элементов трения и мерзлых пород [158]

Термопоромеханическая модель [122] учитывает взаимодействие фаз во времени и достоверно отражает влияние скорости деформации на ползучесть, что подтверждается результатами трехосных испытаний (Рисунок 12).

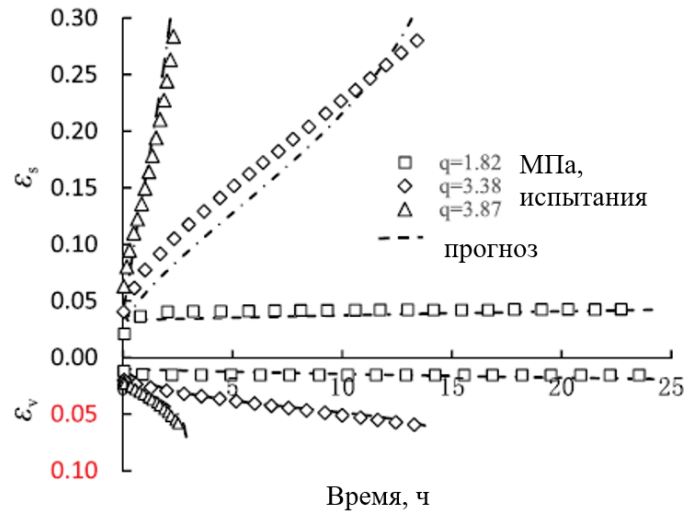


Рисунок 12 – Сравнение результатов испытаний и прогноза трехосной ползучести мерзлого лёсса при постоянном напряжении сдвига [122]

Классическая модель Нишихары [104] описывает неустановившуюся и установившуюся стадии деформирования. Для описания разрушения (прогрессирующей стадии) предложена ее модификация [144], в которой в коэффициент вязкости введены переменные упрочнения и повреждения.

Вязкоупруго-пластическая модель [101] также базируется на теории гомогенизации для установления связи между микро- и макродеформациями. Она учитывает реологический фактор и физическое взаимодействие частиц пород и льда в процессе разрушения связей (Рисунок 13).

Ледоцемент Частицы породы Разрушение ледоцемента

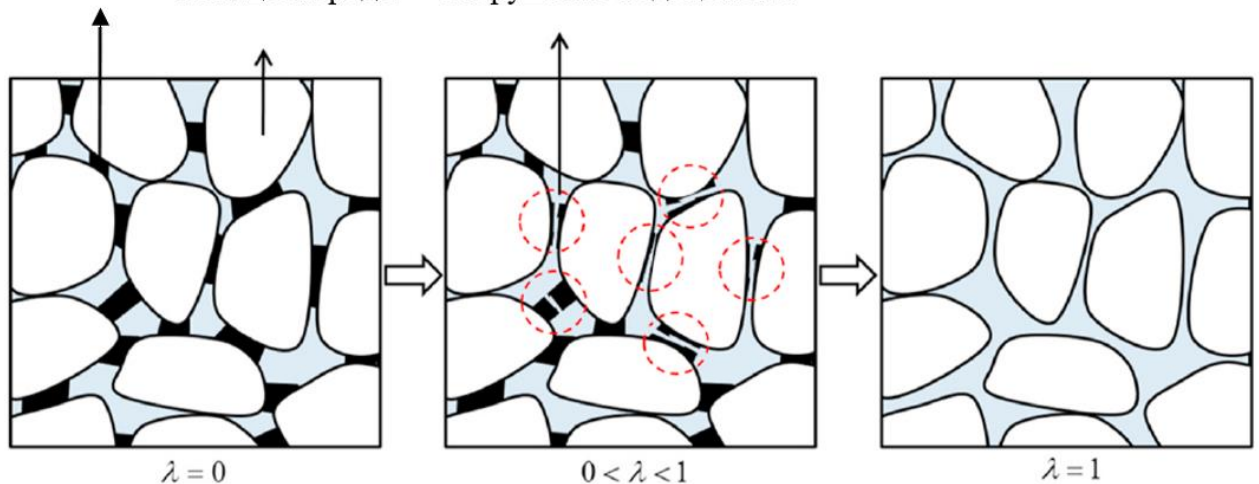


Рисунок 13 – Схема процесса разрушения связанных элементов [101]

1.3.4 Геомеханические модели ММП, учитывающие влияние температуры и фазовых переходов

В работе [130] представлена полностью связанная термо-гидро-механическая (ТГМ) конечно-элементная формула, учитывающая взаимодействие тепловых, гидравлических и механических процессов. В качестве переменных состояния в модели используются давление льда, жидкости и общее напряжение. Новая механическая модель объединяет поведение мерзлых и талых пород в рамках подхода, основанного на эффективных напряжениях, и учитывает зависимость прочности на сдвиг от температуры и пористости.

Диссертация [82] и работы [83, 84] посвящены разработке модели, способной отражать основные особенности поведения ММП, включая температурную зависимость жесткости и прочности на сдвиг, и решать задачи морозного пучения и осадки при оттаивании. Модель была включена в программу PLAXIS 2D. Однако ее сложность и множество параметров для калибровки создают трудности для практики.

В [84] предложен практический метод оценки свойств ММП с использованием минимального количества исходных данных, в частности, для определения характеристической кривой промерзания породы (SFCC – зависимость содержания незамерзшей воды от температуры) и гидравлической проводимости на основе гранулометрического состава (PSD) и удельной площади поверхности (SSA). Подход предполагает, что замерзшие поры влияют на поток воды аналогично порам, заполненным воздухом, и не учитывает породы с высоким содержанием органики или необычной формой частиц.

Применение расширенного метода конечных элементов X-FEM для анализа теплообмена с изменением фазы предложено в [102]. Упругопластическая модель, учитывающая температурные и криогенные эффекты всасывания, представлена в [143]. Модель взаимодействия сваи с породой в условиях промерзания и морозного пучения [153] объединяет уравнения равновесия, физические уравнения и уравнения теплопроводности. Единая упруго-пластическая модель [169], расширяющая Clay and Sand Model, описывает мерзлые и талые состояния через концепцию остаточного напряжения и переменную объемного содержания льда $S_i(\theta)$.

1.3.5 Геомеханические модели мерзлых засоленных пород

Засоленность существенно изменяет физико-механические свойства ММП: она понижает температуру замерзания поровой влаги, что напрямую влияет на прочность и деформируемость пород. Для прогнозирования поведения мерзлых засоленных песков (с Na_2SO_4) предложена анизотропная модель, базирующаяся на теории диссипации энергии [113].

Альтернативным подходом является упругопластическая модель [148], основанная на поверхностях текучести при сверх/субнагрузках, учитывает переменную повреждения и прочность связи для описания упругого и пластического повреждения. Закон развития повреждений подчиняется статистическому распределению Вейбулла. Модель проверена на данных трехосных испытаний мерзлых песчаных и мерзлых засоленных пород, демонстрируя способность описывать упрочнение/размягчение и дилатансию при изменяющемся давлении.

Подход позволяет достоверно моделировать эффекты дилатансии, а также деформационного упрочнения и разупрочнения засоленных ММП при различных уровнях давления.

1.3.6 Геомеханические модели мерзлых пород для изменяющихся условий и учета неоднородности

Для высокотемпературной мерзлой глины, характеризующейся случайным распределением микротрещин, в [109, 116] предложены вероятностные методы и статистическая модель разрушения на основе критерия Мора-Кулона, учитывающую переменную повреждения D (Рисунок 14).

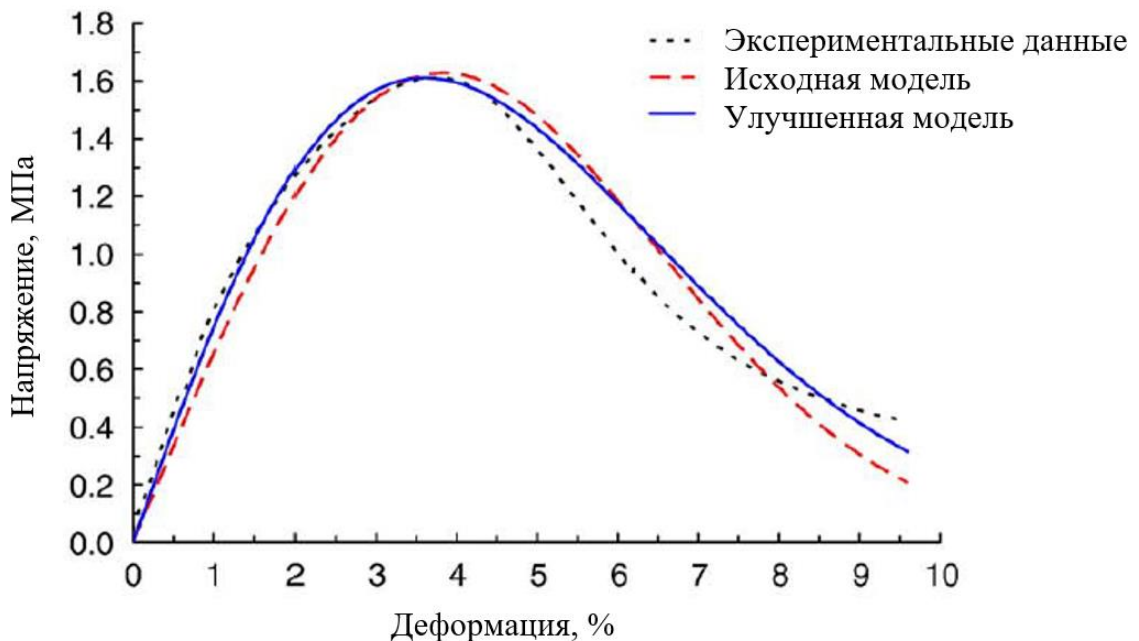


Рисунок 14 – Сравнение экспериментальных и теоретических данных высокотемпературной мерзлой глины при $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [116]

Упруго-пластическая модель для мерзлого песка [111], включающая переменные поперечного анизотропного повреждения и функцию текучести на основе постулата Друкера, учитывает эффекты упрочнения и ослабления.

Работа [98] посвящена упругопластической модели для насыщенных мерзлых пород, учитывающей содержание льда, температуру и криогенное всасывание. Модель использует

параметр криогенного всасывания для учета изменений температуры и их влияния на содержание льда, позволяя описывать сегрегацию льда и плавление под давлением. Аналогично, модель [106] учитывает совместное влияние зерен породы и кристаллов льда, расширяя концепцию эффективного напряжения Бишопа для учета содержания льда, температуры, давления и скорости деформации.

Исследование [124] посвящено мерзлым неоднородным породам (смесь крупных и мелких зерен). Увеличение массового соотношения крупных зерен первоначально снижает прочность (уменьшение сцепления со льдом), но затем увеличивает ее за счет повышения трения между частицами.

Для описания сложных характеристик сдвиговой прочности ММП при различных напряженных состояниях и температурах, в [117] предложена идея разделения прочности на основную (скелета) и особую (порового льда), а также трехступенчатый критерий прочности мерзлых пород.

Рассмотренные модели демонстрируют стремление к учету ключевых факторов (температура, время, лед, засоленность, неоднородность) и верификацию на экспериментальных данных. Для Принципа I важны модели, адекватно описывающие поведение ММП при отрицательных температурах. Их применение способствует созданию надежной инфраструктуры в Арктике. Выбор модели зависит от задачи, данных и требуемой точности.

1.4 Цель и задачи исследования

Освоение обширных территорий криолитозоны, обладающих значительными запасами полезных ископаемых, неразрывно связано со строительством и эксплуатацией сложных инженерных объектов, таких как технологические платформы. Надежность и долговечность этих сооружений во многом определяются несущей способностью системы «свайное основание – мерзлый массив». Проведенный в предыдущих разделах анализ показал, что, несмотря на значительный объем исследований, остается ряд нерешенных и актуальных вопросов. Существующие аналитические методы расчета свай в ММП не всегда позволяют с достаточной точностью учесть сложную геометрию, неоднородность криогенного строения, реологические свойства ММП и сопряженное термомеханическое взаимодействие системы «сооружение – свайное основание» в течение длительного срока эксплуатации. Современные численные модели требуют адаптации и верификации для конкретных условий технологических платформ, особенно с учетом влияния засоленности мерзлых пород и необходимости активного управления температурным режимом основания. Это обуславливает актуальность проведения исследований, направленных на совершенствование подходов к геомеханическому обоснованию параметров свайных оснований.

Цель работы: разработка способа повышения несущей способности свайных оснований технологических платформ при эксплуатации в условиях криолитозоны.

Задачи (структура исследования):

- Научное обобщение и анализ применяемых способов возведения технологических платформ, физико-механических свойств ММП и методов расчета свайных оснований в условиях криолитозоны;
- Натурные и лабораторные исследования деформационно-прочностных свойств ММП и изменения термического режима при устройстве свайных оснований;
- Обоснование и разработка численной модели системы «технологическая платформа – свайное основание – многолетнемерзлый массив»;
- 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;
- Разработка практических рекомендаций по выбору параметров свайных оснований для типовых инженерно-геокриологических условий строительства технологических платформ в криолитозоне.

1.5 Выводы по главе 1

По результатам выполненного в первой главе анализа состояния вопроса по теме диссертационного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Строительство и эксплуатация горнотехнических сооружений, в частности технологических платформ, в условиях криолитозоны требуют применения специальных инженерных решений. Для обеспечения долговременной устойчивости таких объектов предпочтительным является Принцип I строительства, предполагающий сохранение многолетнемерзлого состояния грунтов основания. Наиболее распространенным и эффективным типом оснований при этом являются свайные, часто в сочетании с методами активной и пассивной термостабилизации пород.

2. Физико-механические свойства многолетнемерзлых пород определяются их сложным составом, криогенным строением, льдистостью, засоленностью и, в первую очередь, температурой и длительностью действия нагрузки. Научные исследования отечественных и зарубежных ученых внесли значительный вклад в понимание этих свойств. Учет особенностей поведения ММП и их изменчивости под влиянием внешних факторов является ключевым для корректного геомеханического обоснования параметров свайных оснований.

3. Существующие методы расчета свайных оснований в ММП включают как нормативные аналитические подходы, так и численные методы моделирования. Аналитические

методы, несмотря на их широкое применение, имеют ограничения в учете всей сложности напряженно-деформированного состояния и теплового режима системы «сооружение-свая-мерзлый массив». Активно развиваются и применяются современные геомеханические модели, позволяющие учитывать реологические свойства ММП, влияние температуры, засоленности, неоднородности и ледовых включений. Адаптация и применение таких моделей для комплексного термомеханического анализа работы свайных оснований технологических платформ являются перспективным направлением.

4. Проведенный анализ подтверждает актуальность проблемы геомеханического обоснования параметров свайных оснований технологических платформ в криолитозоне. Выявлена необходимость совершенствования существующих подходов на основе разработки и применения комплексных численных моделей, учитывающих специфику ММП и условия их взаимодействия с сооружением. Решение поставленных в диссертационной работе цели и задач, направленных на разработку соответствующих рекомендаций, будет способствовать повышению эффективности освоения северных территорий.

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

На полуострове Ямал, где распространены слабые дисперсные мерзлые породы с различной степенью засоления, несущая способность которых значительно снижается при повышении температуры [50, 93] особенно актуальной является задача определения механических свойств и поведения мерзлых пород в условиях действия различных нагрузок и температур [35, 166]. Засоленность мерзлых пород также может существенно изменять их физико-механические свойства, понижая температуру замерзания, снижая прочность и увеличивая деформируемость [7, 55, 113]. Прогнозирование деформаций и устойчивости оснований, определение прочности сцепления мерзлых пород с материалами свайных оснований [100, 120, 171], а также выбор оптимальных методов строительства и укрепления оснований [32, 114, 147] являются первостепенными задачами для успешного освоения региона.

Комплекс экспериментальных исследований, представленный в настоящей главе, направлен на выявление закономерностей изменения физико-механических свойств дисперсных многолетнемерзлых пород, отобранных на одном из ключевых месторождений полуострова Ямал. Особенностью исследуемых мерзлых пород является наличие засоленности, которая выступает фактором, смещающим точку фазового равновесия.

Для достижения поставленной цели во второй главе решаются следующие задачи:

- Обоснование и формирование представительной выборки образцов мерзлых пород для обеспечения достоверности результатов;
- Определение физических характеристик (типа породы, влажности, засоленности, льдистости и т.п.);
- Определение теплофизических характеристик (температура начала замерзания, теплоемкость, теплопроводность), необходимых для моделирования процесса теплового взаимодействия «свайное основание-мерзлый массив»;
- Экспериментальное определение прочностных и деформационных свойств мерзлых пород и параметров их взаимодействия с материалом сваи (сопротивление срезу по поверхности смерзания) при заданном температурном режиме;
- Статистическая обработка и анализ полученных данных для установления корреляционных зависимостей между физическими свойствами пород и их механическими параметрами.
- Подготовка верифицированного набора входных данных для разработки геомеханической модели, описывающей поведение и НДС системы «свайное основание-мерзлый массив» в условиях воздействия температурных полей.

Планирование эксперимента основывалось на необходимости получения комплексных параметров для последующего численного моделирования. Объектом исследований послужили мерзлые породы, отобранные в количестве 380 образцов, что является достаточным для обеспечения статистической значимости результатов. Экспериментальные определения проводились при фиксированных температурных значениях, соответствующих естественному состоянию массива, с параллельным изучением теплофизических констант (теплопроводности, теплоемкости и температуры начала замерзания), определяющих динамику фазовых переходов воды в порах. Выбор расчетной температуры испытаний ($-3\text{ }^{\circ}\text{C}$) обусловлен анализом геотермических условий месторождений полуострова Ямал и прогнозными значениями температуры пород на глубине заложения свайных оснований технологических платформ.

Программа испытаний включала исследование физических свойств, изучение прочностных и деформационных характеристик методом компрессионного сжатия, шарикового штампа, а также определение сопротивления сдвигу по поверхности смерзания мерзлой породы с материалом сваи, что является критически важным параметром для оценки несущей способности основания.

Для повышения достоверности геомеханической модели полученные экспериментальные данные подверглись математико-статистической обработке. Проверка гипотезы о характере распределения по критерию Шапиро-Уилка подтвердила соответствие полученных данных закону нормального распределения. Проведенный корреляционный анализ позволил выявить тесноту связей между физическими показателями и механическими параметрами. Сформированный массив данных является эмпирической основой для решения задачи о распределении температурных градиентов в массиве и определения оптимальных сроков нагружения свайных оснований после восстановления мерзлого состояния пород.

2.1 Методика испытаний и определения деформационно-прочностных свойств грунтов и горных пород в условиях отрицательных температур

Геологическое строение площадки изысканий (Рисунок 15) представлено верхнеплейстоцен-голоценовыми морскими отложениями, которые в мерзлом состоянии в основном сложены глинами и суглинками, реже супесями и песками [155]. Район характеризуется сложным геологическим строением, наличием пород различного состава и льдистости, а также присутствием засоленных пород в прибрежной зоне.

2.1.1 Исследуемые материалы и подготовка образцов

Отбор монолитов пород производился с использованием специальных методов и оборудования, минимизирующих механическое воздействие и обеспечивающих сохранение природной структуры и криогенной текстуры образцов. Приоритетной задачей являлось

сохранение естественной криогенной текстуры и влажностного режима керна, так как эти факторы определяют анизотропию свойств и реологический потенциал мерзлых пород.

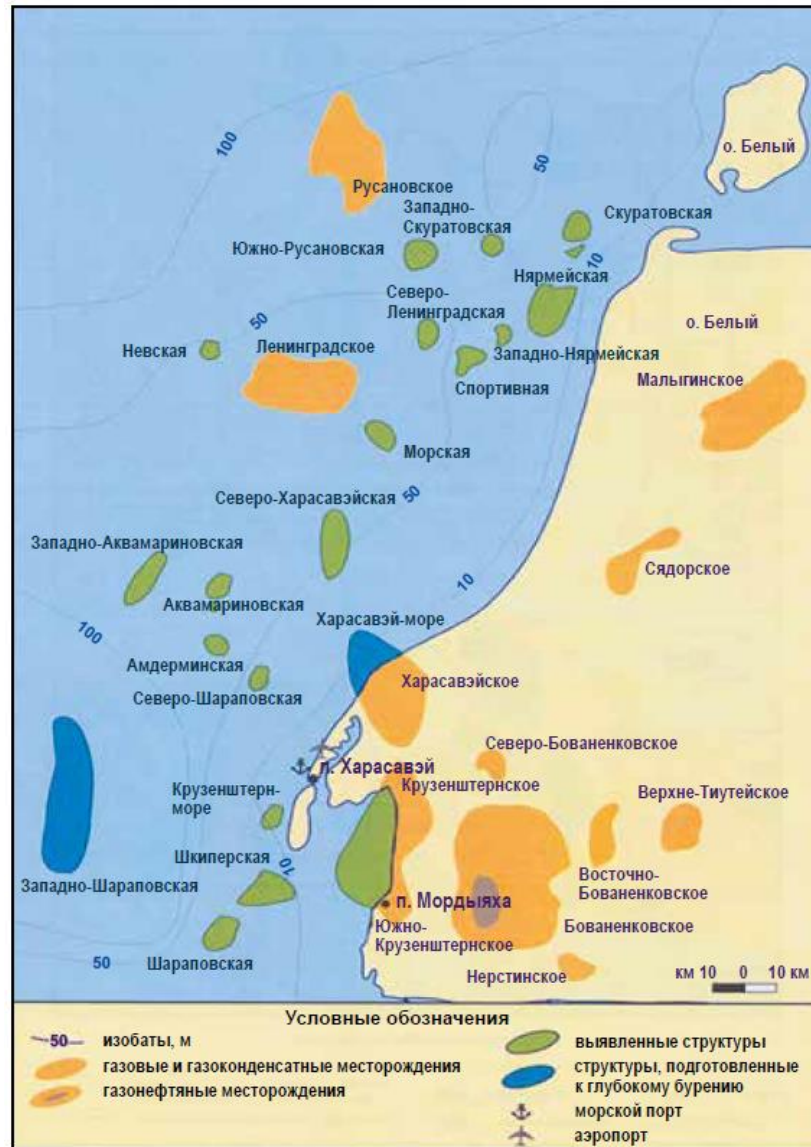


Рисунок 15 – Карта-схема расположения полуострова Ямал и месторождений [94]

В соответствии с ГОСТ 12071-2014 [18], извлеченные монолиты подвергались консервации для предотвращения разрушения льдоцементационных связей и транспортировались в термоконтейнерах. Хранение образцов производилось в стационарных условиях, моделирующих естественное температурное поле массива, что исключало необратимые фазовые переходы и разрушение структурных связей.

После доставки в лабораторию для каждого из 380 образцов были определены комплекс физических свойств в соответствии с ГОСТ 5180-2014 [17] и ГОСТ 12536-2014 [22], а также теплофизических свойств в соответствии с ГОСТ 26263-84 [25]. Определялись природная (суммарная) влажность, плотность, плотность частиц пород, гранулометрический состав, содержание органических веществ, степень засоленности, суммарная льдистость, коэффициент

теплопроводности и удельная теплоемкость образцов (Рисунок 16). Также образцы были классифицированы по ГОСТ 25100-2020 [24].

Подготовка образцов к механическим испытаниям осуществлялась в условиях отрицательной температуры. Способ подготовки и геометрия образцов определялись видом моделируемого напряженного состояния.

Для испытаний на компрессионное сжатие был изготовлен 251 цилиндрический образец диаметром 71,4 мм и высотой 35 мм методом режущего кольца, обеспечивающим условия невозможности бокового расширения. Для испытаний методом среза по поверхности смерзания было подготовлено 362 образца аналогичных размеров, имеющие поверхность смерзания с материалом сваи (металл).



Рисунок 16 – Характерная криогенная текстура образцов мерзлых пород (составлено автором)

Непосредственно перед началом механических испытаний подготовленные образцы выдерживались в термокамере при заданной постоянной отрицательной температуре ($-3\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) в течение не менее 24 часов для полного выравнивания температурного поля по всему объему образца.

Ниже (Рисунок 17) представлено распределение испытанных образцов мерзлых пород по типам и засоленности.



Рисунок 17 – Гистограмма распределения отобранных образцов по типам и засоленности (составлено автором)

2.1.2 Методика определения характеристик деформируемости мерзлых грунтов методом компрессионного сжатия

Определение деформационных характеристик мерзлых пород проводилось методом компрессионного сжатия в соответствии с [21]. Для испытаний использовался компрессионный прибор производства НПП «Геотек» (г. Пенза, Россия), размещенный в термокамере (Рисунок 18). В результате испытаний определялись количественные параметры деформируемости – коэффициент сжимаемости и модуль деформации, необходимые для параметрического обеспечения моделей расчета осадок и консолидации многолетнемерзлых оснований.

Испытания выполнялись в одометрах, конструктивная схема которых обеспечивает реализацию граничных условий отсутствия боковых деформаций. Сущность метода заключается в приложении к образцу, находящемуся в жестком металлическом кольце, ступенчато возрастающей вертикальной нагрузки.

В ходе испытания образец нагружался ступенями. Каждая ступень нагрузки прикладывалась с заданной скоростью и выдерживалась до момента условной стабилизации деформаций. Стабилизация контролировалась высокоточным датчиком вертикальных перемещений по критерию, установленному в [ГОСТ 12248.10]. Во время испытаний непрерывно регистрировались приложенная вертикальная нагрузка, вертикальная деформация образца и время.

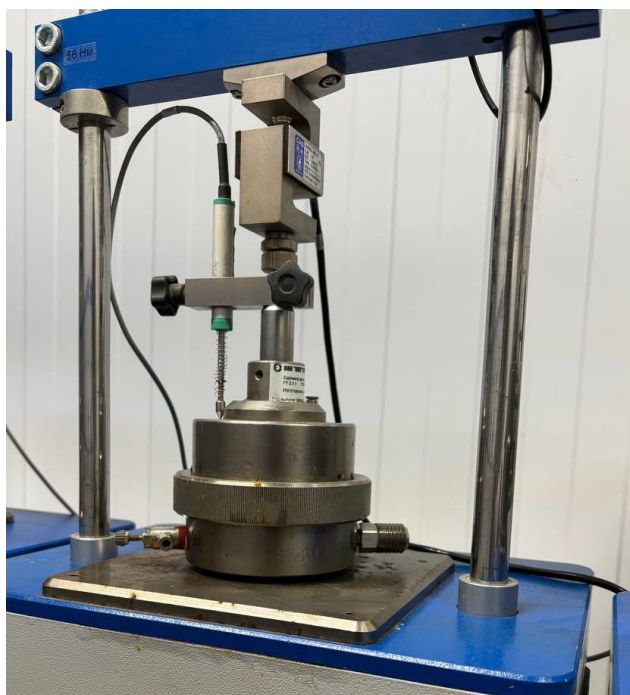


Рисунок 18 – Вид компрессионного прибора (составлено автором)

По результатам обработки полученных данных строились компрессионные кривые – графики зависимости относительной деформации от приложенной нагрузки.

Коэффициент сжимаемости пластично-мерзлого грунта определялся как тангенс угла наклона секущей к компрессионной кривой в заданном интервале давлений (2):

$$m_f = \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{p_{i+1} - p_i}, \quad (2)$$

где m_f – коэффициент сжимаемости, МПа⁻¹;

p – давление на образец на каждой ступени нагружения, МПа;

ε – относительная стабилизированная вертикальная деформация образца грунта.

Для перехода к модулю деформации применялся корректирующий коэффициент $\beta = 0,8$, учитывающий невозможность бокового расширения образца в условиях эксперимента (3):

$$E = \frac{\beta}{m_f}, \quad (3)$$

Полученный массив данных использован для выявления корреляционных зависимостей между сжимаемостью мерзлых пород, их льдистостью и степенью засоленности, что является необходимым условием для построения адекватной геомеханической модели основания.

2.1.3 Методика определения характеристик прочности мерзлых грунтов методом среза по поверхности смерзания

Ключевым фактором, обеспечивающим несущую способность свайных оснований технологических платформ в мерзлых породах, являются силы смерзания по боковой

поверхности. Для геомеханического обоснования параметров взаимодействия системы «ММП – свайное основание» необходимо экспериментальное определение прочностных характеристик контактной зоны, работающей в условиях сложного напряженного состояния. Прочностные характеристики определялись методом одноплоскостного среза по поверхности смерзания в соответствии с [20]. Испытания проводились на приборе одноплоскостного среза НПП «Геотек», оснащенный термокамерой (Рисунок 19).



Рисунок 19 – Прибор для испытаний методом одноплоскостного среза и образец мерзлого суглинка (составлено автором)

Испытания проводились по схеме «порода – материал сваи». Формирование контактной зоны осуществлялось путем промораживания грунта в контакте с металлом, что позволяло воспроизвести криогенные адгезионные связи, формирующиеся в реальных условиях эксплуатации свай.

В качестве материала сваи использовались металлические плашки с регламентированной шероховатостью, имитирующие боковую поверхность сваи из стали класса прочности 345 марки 09Г2С по [23], которая широко применяется для изготовления стальных свай. Образцы пород помещались в рабочие кольца и формы, где происходило их промораживание в контакте с металлической поверхностью. Режим промораживания обеспечивал формирование криогенной текстуры, характерной для условий обратного смерзания свай и пород.

Процедура испытания включала приложение к образцу заданной постоянной нормальной нагрузки и последующее приложение ступенчато возрастающей сдвигающей нагрузки. Каждая ступень сдвигающей нагрузки выдерживалась до условной стабилизации сдвиговых деформаций. Нагружение продолжалось до момента разрушения контактных связей или

перехода в стадию незатухающей ползучести, что соответствует исчерпанию несущей способности контактной зоны. За критерий стабилизации принималось приращение деформации среза, не превышающее 0,01 мм за 12 часов. В ходе испытаний регистрировались сдвигающая нагрузка, сдвиговая деформация и время. По результатам обработки данных определялась величина максимального длительного сопротивления сдвигу мерзлой породы по поверхности смерзания с материалом сваи.

2.1.4 Методика определения характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов методом испытания шариковым штампом

Для оценки локальных прочностных и реологических характеристик мерзлых пород, а также для определения предельно длительного значения эквивалентного сцепления применялся метод вдавливания шарикового штампа в соответствии с ГОСТ 12248.7-2020 [19].

Метод моделирует сложное напряженно-деформированное состояние в зоне локального контакта сферического индентора с полупространством мерзлого грунта. Он позволяет оценить сопротивление материала вязкопластическому течению без разрушения образца.

Эксперимент заключался в погружения шарикового штампа в образец породы под действием постоянной нормальной нагрузки. Испытания проводились на приборах испытания мерзлых пород шариковым штампом НПП «Геотек».

Испытания проводились как на образцах мерзлого грунта ненарушенного сложения, так и на искусственно приготовленных образцах. Поверхность образца тщательно выравнивалась для обеспечения плотного контакта со штампом. Для предотвращения сублимации льда и прилипания штампа в зоне контакта использовалась тонкая полиэтиленовая пленка.

Величина нагрузки на штамп выбиралась в зависимости от литологического типа и криогенного состояния пород в соответствии [19]. Через 15 минут после приложения нагрузки производилась проверка выполнения условия корректности испытания. Отсчеты глубины погружения снимались в логарифмической последовательности (1, 5, 10, 15, 20, 30, 60 мин), далее через каждые 2 часа. За критерий условной стабилизации деформации принималось приращение осадки штампа, не превышающее 0,01 мм за 12 часов.

Применение метода шарикового штампа было ориентировано на определение момента перехода от затухающей к установившейся ползучести. Использование критерия условной стабилизации позволило получить значения эквивалентного сцепления, которые соответствуют нижнему пределу длительной прочности мерзлой породы. Именно этот параметр является базовым для геомеханического прогноза поведения массива в основании технологических платформ, исключая риск неконтролируемых деформаций. Расчет производился по формуле (4):

$$c_{eq} = 0,6K_n \frac{F}{d_b S_b}, \quad (4)$$

где F – нагрузка на штамп, кН;

d_b – диаметр штампа, см;

S_b – глубина погружения штампа к моменту стабилизации, см;

K_n – безразмерный коэффициент.

Полученные значения длительного значения эквивалентного сцепления использовались для сравнительной оценки прочностных свойств различных литологических разностей и контроля однородности свойств мерзлого массива.

2.2 Исследование влияния физико-химических характеристик на теплофизические свойства дисперсных грунтов и пород

2.2.1 Анализ закономерностей изменения физических свойств мерзлых пород

В результате исследования 380 образцов мерзлых пород полуострова Ямал были получены значения их физических свойств. Для корректной интерпретации полученных данных для дальнейшего численного моделирования был выполнен статистический анализ суммарной влажности, плотности, суммарной льдистости и степени засоленности образцов. Важно отметить, что на наблюдаемые зависимости влияет сложное взаимодействие множества факторов, и представленный анализ служит основой для понимания этих зависимостей. Обобщенные результаты определения физических свойств в зависимости от типа породы представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты определения физических характеристик образцов (по данным автора)

Тип пород	Песок	Супесь	Суглинок	Глина
Суммарная влажность, д.е.	0,26-0,30	0,28-0,45	0,35-0,64	0,33-0,47
Максимальная влажность, д.е.	0,45	1,60	2,61	1,89
Минимальная влажность, д.е.	0,24	0,20	0,20	0,22
Плотность, г/см ³	1,80-1,89	1,59-1,79	1,56-1,77	1,65-1,83
Максимальная плотность, г/см ³	1,97	2,18	2,09	2,17
Минимальная плотность, г/см ³	1,34	0,97	0,95	0,83
Суммарная льдистость, д.е.	0,42-0,44	0,25-0,40	0,30-0,51	0,26-0,40
Максимальная льдистость, д.е.	0,63	0,84	0,84	0,94
Минимальная льдистость, д.е.	0,37	0,21	0,20	0,11
Засоленность, %	0,10-0,20	0,08-0,25	0,09-0,18	0,17-0,47
Максимальная засоленность, %	0,50	0,35	0,69	1,34
Минимальная засоленность, %	0,07	0,06	0,05	0,07

Анализ полученных распределений, представленный на рисунке 20, позволяет выявить ряд закономерностей, определяющих механическое поведение массива.

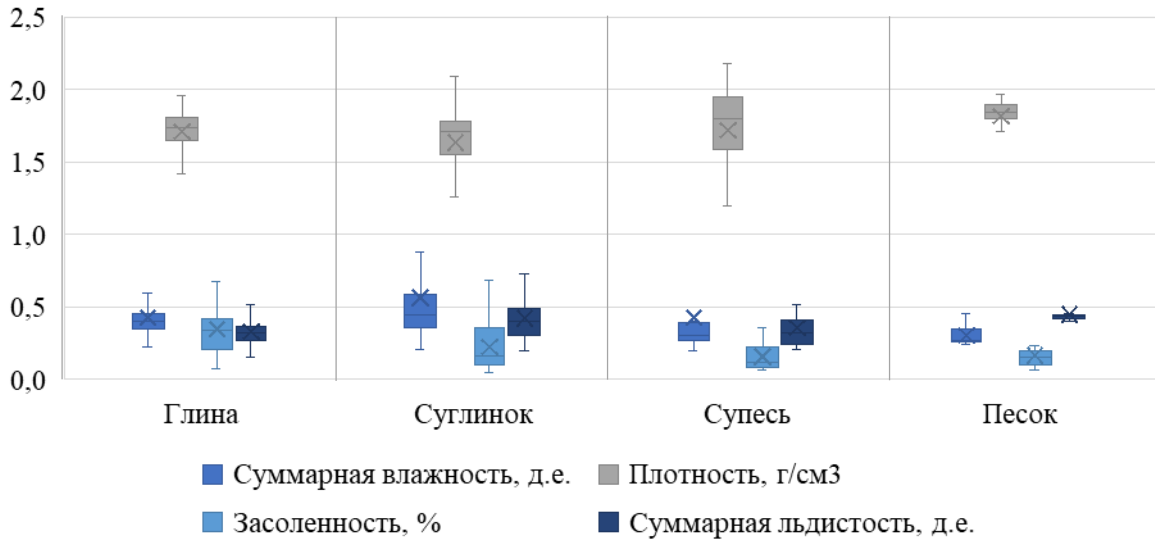


Рисунок 20 – Распределение физических свойств для каждого типа мерзлых пород (составлено автором)

Установлено, что физические свойства пород существенно варьируются в зависимости от их гранулометрического состава. Наиболее высокие показатели суммарной влажности характерны для связных пород: максимальные средние значения (около 0,5 д.е.) отмечаются у суглинков, тогда как в песках этот показатель снижается до 0,3 д.е.

Аналогичная тенденция прослеживается и в отношении суммарной льдистости: для суглинков она составляет около 0,4–0,5 д.е., для глин порядка 0,3–0,4 д.е., в то время как в песках значения льдистости заметно выше показателей влажности и достигают 0,45 д.е. При этом для глин и суглинков характерен более широкий разброс значений льдистости по сравнению с песками.

Показатели плотности демонстрируют обратную зависимость: наиболее уплотненными являются пески (среднее значение $\sim 1,85$ г/см³), в то время как связные породы характеризуются несколько меньшими значениями (от 1,65 до 1,75 г/см³). Засоленность наиболее выражена в глинах (среднее значение $\sim 0,35\%$), тогда как в супесях и песках она минимальна и не превышает 0,15–0,2%.

Высокие значения льдистости, особенно в связных породах, свидетельствуют о наличии криогенных текстур массивного и слоистого типа. Это указывает на то, что прочность таких пород в мерзлом состоянии будет определяться не столько контактами минеральных частиц, сколько прочностью ледовых включений (ледоцемента).

Плотность мерзлых пород также зависит от типа пород и варьируется в зависимости от влажности и льдистости. Пески, обладающие более жестким минеральным скелетом, демонстрируют наиболее стабильные и высокие значения плотности (1,80–1,89 г/см³), что предопределяет их работу преимущественно за счет сил внутреннего трения

Характерной особенностью исследованных мёрзлых пород является наличие засоленных образцов: от слабо до сильнозасоленных. Установлено, что максимальные значения засоленности наблюдались в глинах (до 1,34%). Наличие солей в мерзлых породах влияет на температуру начала замерзания воды, что также может оказывать воздействие на их механические свойства.

Анализ физических свойств показал, что влажность, плотность, засоленность и льдистость мерзлых пород тесно связаны между собой и оказывают существенное влияние на их механическое поведение.

2.2.2 Анализ закономерностей изменения теплофизических свойств мерзлых пород, определяющих температурный режим основания

Теплофизические свойства пород являются ключевыми параметрами, определяющими кинетику промерзания и оттаивания массива при технологических воздействиях. На основании комплекса проведенных лабораторных исследований были определены диапазоны изменения теплофизических характеристик (теплопроводности и теплоемкости) для четырех основных типов дисперсных пород: песков, супесей, суглинков и глин различной степени засоленности в талом и мерзлом состояниях. Результаты определения коэффициента теплопроводности в талом λ_{th} и мерзлом λ_f состояниях, а также удельной теплоемкости в талом C_{th} и мерзлом C_f состояниях сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Средние значения теплофизических характеристик исследуемых пород (по данным автора)

Порода	Тип	λ_{th} , Вт/(м·К)	λ_f , Вт/(м·К)	C_{th} , Дж/(кг·К)	C_f , Дж/(кг·К)
Глина	Незасоленная	1,249	1,471	1911,8	1221,2
	Слабозасоленная	1,186	1,407	1748,5	1161,8
	Среднезасоленная	1,224	1,423	1764,3	1167,5
	Сильнозасоленная	1,462	1,604	1630,7	1112,6
Суглинок	Незасоленный	1,314	1,559	1980,6	1245,6
	Слабозасоленный	1,156	1,378	2045,1	1286,0
	Среднезасоленный	1,161	1,372	1747,6	1162,3
Супесь	Незасоленная	1,208	1,470	1769,8	1164,1
	Слабозасоленная	1,266	1,454	1515,6	1065,2
Песок	Слабозасоленный	1,590	2,001	1446,4	1022,5
	Среднезасоленный	1,451	1,591	1551,2	1099,3
	Сильнозасоленный	1,315	1,601	1606,8	1108,5

Установлено закономерное возрастание коэффициента теплопроводности при переходе из талого в мерзлое состояние для всех литотипов. Например, для талых незасоленных суглинков среднее значение коэффициента теплопроводности λ_{th} составило 1,31 Вт/(м·К), в то время как для мерзлых – λ_f возросло до 1,56 Вт/(м·К). Это обусловлено замещением поровой воды ($\lambda_w \approx 0,58$ Вт/(м·К)) льдом, теплопроводность которого в 4 раза выше ($\lambda_{ice} \approx 2,2$ Вт/(м·К)).

Оценка влияния засоленности на теплопроводность мерзлых пород показала зависимость от дисперсности пород (Рисунок 21). Так, для песков выражена обратная корреляция ($r=-0,528$). Увеличение засоленности приводит к снижению коэффициента теплопроводности мерзлого песка на 20-25%. С физической точки зрения это объясняется тем, что засоление увеличивает долю незамерзшей воды, обладающей существенно меньшим коэффициентом теплопроводности по сравнению со льдом.

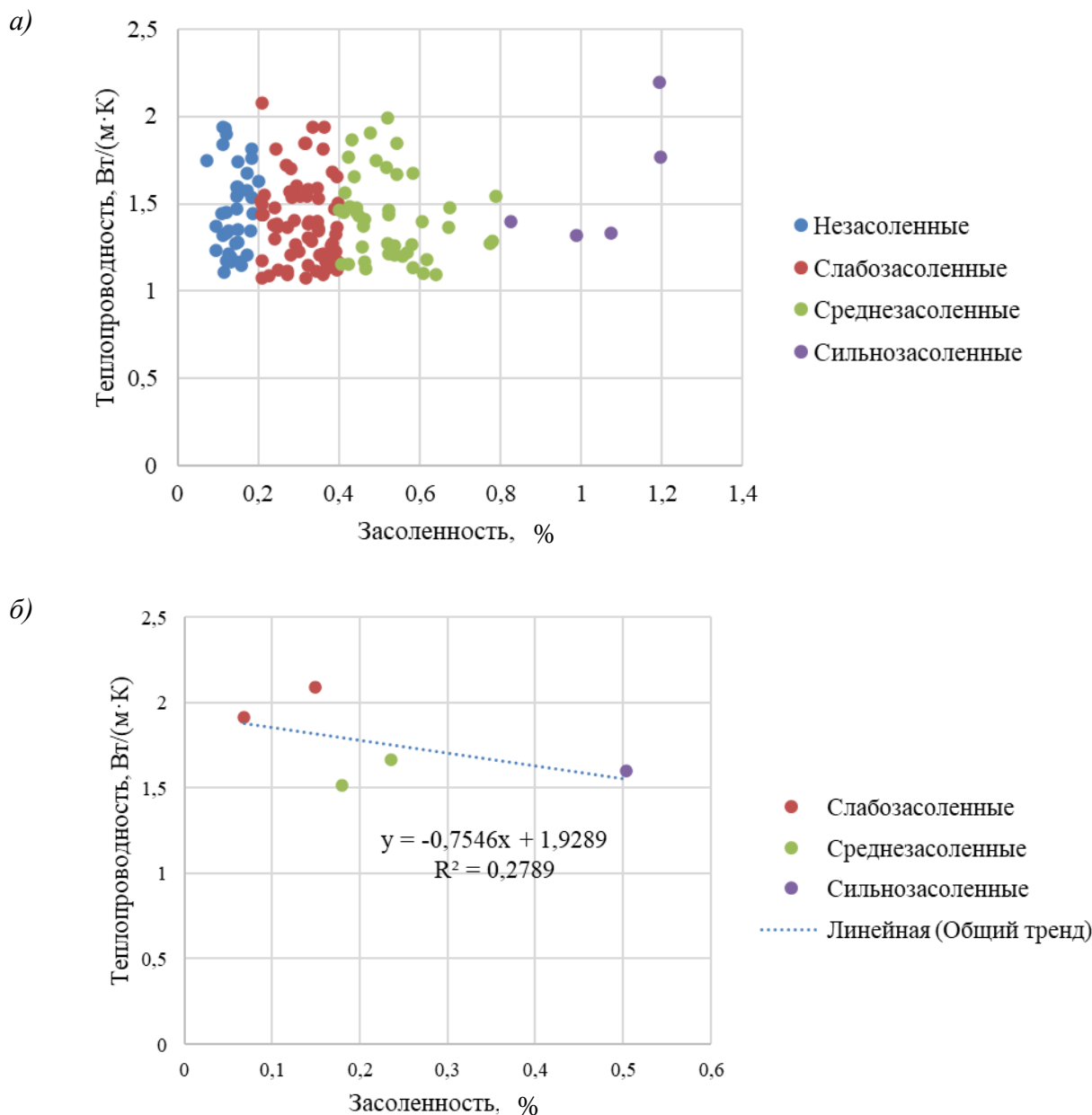
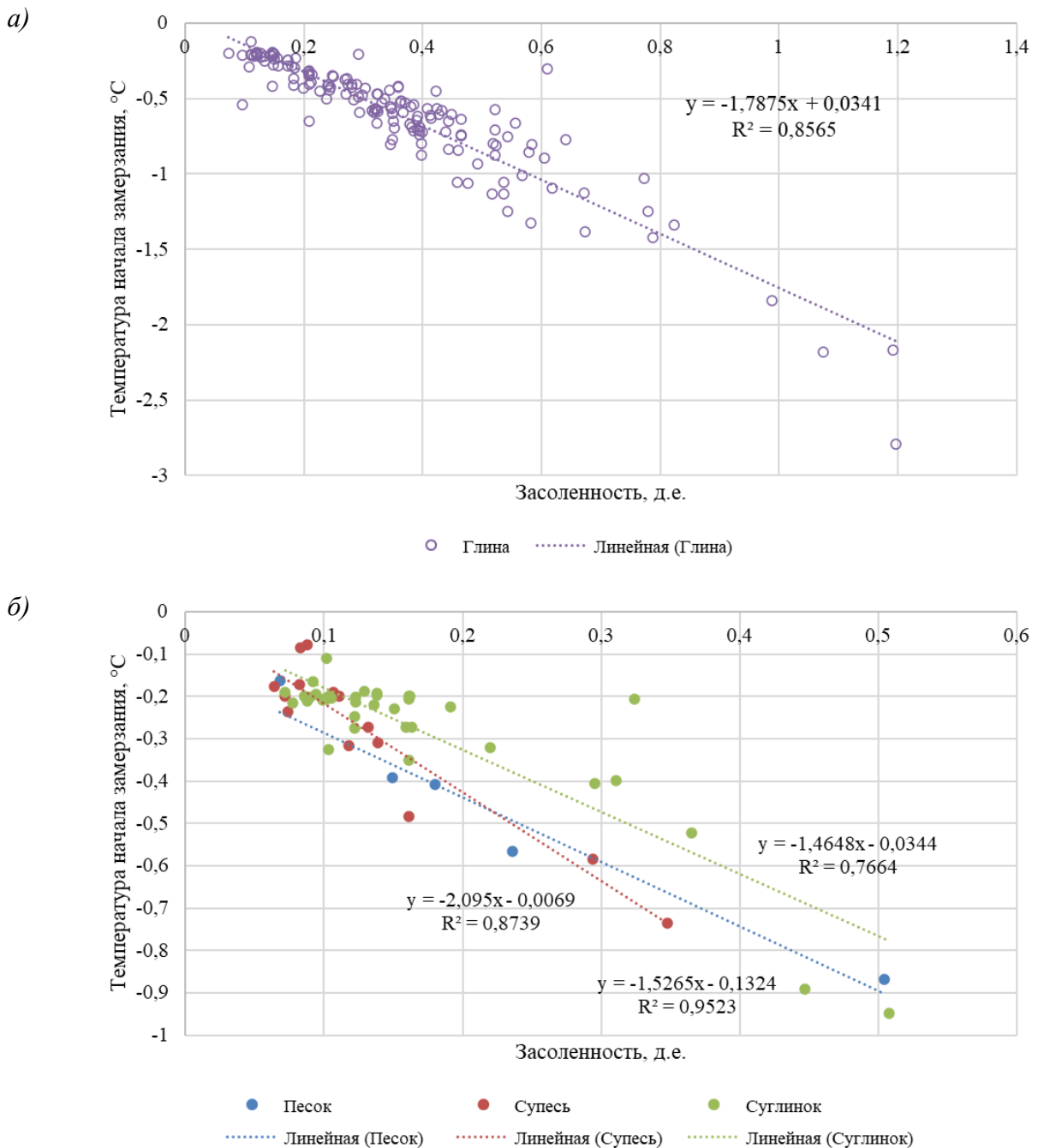


Рисунок 21 – Зависимость коэффициента теплопроводности мерзлых пород от засоленности при $T = -3^{\circ}\text{C}$: а) глины; б) пески (составлено автором)

В то же время для глинистых пород влияние засоления на теплопроводность в мерзлом состоянии практически не отмечается ($r=0,021$), это связано с преобладающим влиянием поверхностной энергии глинистых частиц, удерживающих связанную незамерзшую воду.

Анализ экспериментальных данных также выявил существенные различия в значениях удельной теплоемкости в талом C_{th} и мерзлом C_f состояниях. Для всех исследованных типов пород зафиксировано закономерное снижение теплоемкости при переходе температуры через точку начала замерзания T_{bf} . Эффект обусловлен изменением фазового состава влаги, теплоемкость образующегося льда $C_{ice} \approx 2,1$ кДж/(кг·К) практически в два раза ниже теплоемкости поровой воды $C_w \approx 4,18$ кДж/(кг·К).

Критически важным параметром для теплотехнических расчетов является температура начала замерзания (Рисунок 22).



Для количественной оценки влияния степени засоленности на теплофизические параметры применялся корреляционный анализ. Выявлена практически строгая обратная линейная зависимость между концентрацией порового раствора и температурой начала замерзания для всех исследуемых типов пород. Это означает, что в засоленных породах процесс замерзания-оттаивания более длительный во времени и проходит в более широком диапазоне температур по сравнению с незасоленными породами, что будет оказывать значительное влияние на сроки обратного смерзания свайного основания.

2.3 Закономерности изменения прочностных и деформационных свойств мерзлых пород и дисперсных грунтов

2.3.1 Анализ сопротивления мерзлых пород сдвигу по поверхности смерзания

Определение прочностных характеристик мерзлых пород, в частности их сопротивления сдвигу по поверхности смерзания с материалом сваи, является ключевой задачей для оценки несущей способности свайных оснований, работающих по Принципу I. В рамках исследования были проведены испытания мерзлых пород методом одноплоскостного среза, согласно методике, изложенной в разделе 2.1.3. Общий объем выборки составил 362 образца, что позволило провести статистически достоверную оценку влияния литологии и степени засоленности на прочностные параметры.

Для комплексной оценки деформационно-прочностного взаимодействия контакта «мерзлый массив-свайное основание» по результатам испытаний при различных нормальных напряжениях были построены паспорта контактной прочности для пород с различной степенью засоленности (Рисунок 23). Пунктирными линиями показаны огибающие предельных состояний для групп образцов с близкими значениями засоленности.

Анализ полученных графиков показывает, что увеличение степени засоленности приводит к почти параллельному смещению огибающих вниз. Это свидетельствует о том, что основным механизмом потери несущей способности сваи является снижение сил сцепления, обусловленная увеличением количества незамерзшей воды на контакте «свая-ММП», в то время как угол трения по поверхности контакта изменяется незначительно. На основании этого вывода дальнейший анализ был сфокусирован на установлении закономерности изменения предельно длительного значения сопротивления срезу по поверхности смерзания от засоленности.

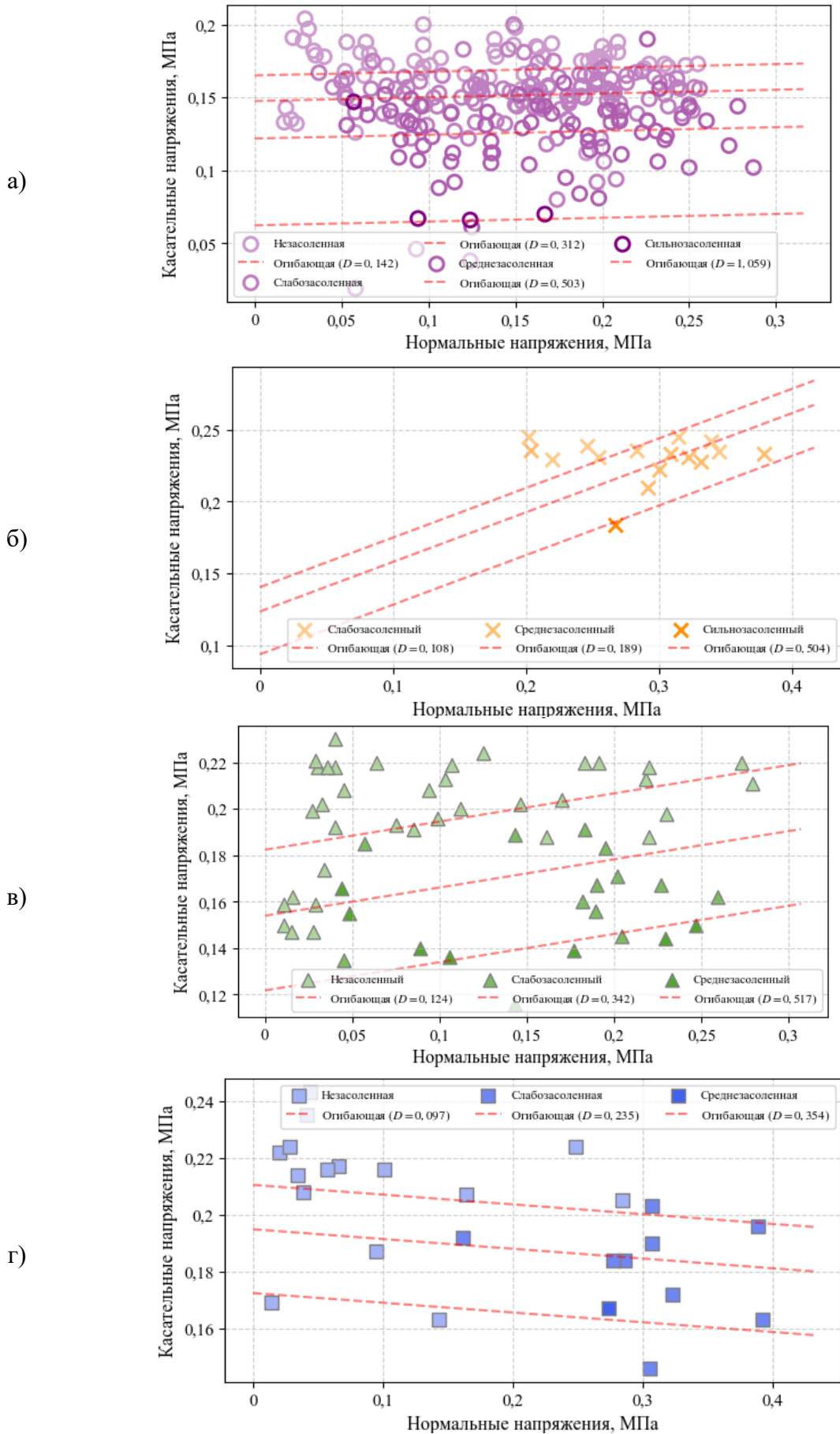


Рисунок 23 – Огибающие сопротивлению срезу по поверхности сmerzания для пород различной засоленности при температуре -3°C : а) глины; б) песка; в) суглинка; г) супеси (составлено автором)

Методика обработки полученных данных основывалась на анализе характера деформирования. Предельно длительное значение сопротивления срезу определялось как максимальное касательное напряжение, при котором деформация образца стабилизировалась при заданном нормальном напряжении для каждого типа исследуемых пород: песков, супесей, суглинков и глин (Рисунок 24). Точки перелома графиков (отмеченные красными маркерами) соответствуют значению предельно длительного сопротивления срезу.

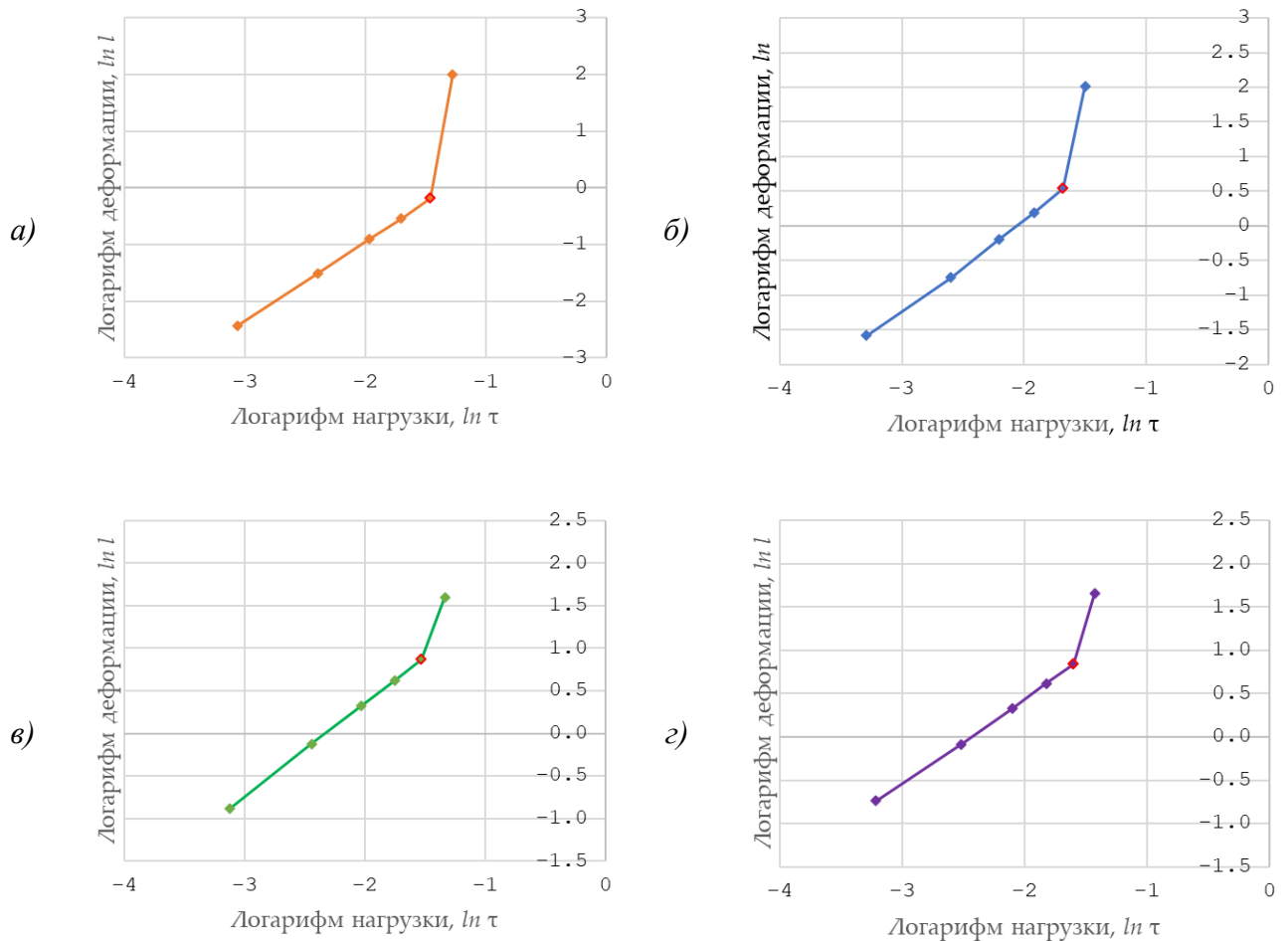


Рисунок 24 – Графики зависимости «напряжение-деформация» при температуре $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$: а) песок; б) супесь; в) суглинок; г) глина. Красными квадратами обозначены значения длительного сопротивления срезу (составлено автором)

Диапазон изменения предельно длительного значения сопротивления срезу для различных типов мерзлых пород при температуре $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты испытаний различных типов мерзлых пород методом одноплоскостного среза (по данным автора)

Порода	Песок	Супесь	Суглинок	Глина
Предельно длительное значение сопротивления срезу, МПа	0,20 - 0,30	0,15 - 0,25	0,10 - 0,22	0,05 - 0,20

Значения предельно-длительного сопротивления срезу мерзлых пород по поверхности смерзания с материалом свай (металл) были сопоставлены с наличием солей в породе (Рисунок 25). Преодоление внешними силами сопротивления сваи приводит к потере прочности и развитию необратимых деформаций сдвига по поверхности контакта свая-породный массив [1].

Анализ полученных зависимостей позволил установить общую закономерность снижения длительного значения сопротивления срезу при увеличении засоленности пород и выявить принципиальное различие в поведении несвязных и связных пород.

При использовании линейной аппроксимации средний градиент падения прочности составляет около 0,13 МПа на 1% засоленности, однако детальный анализ массива данных показывает, что линейная модель не отражает разницу в механизмах ослабления связей для пород различного литологического типа.

Для несвязных пород (Рисунок 25б) линейная модель показывает высокую степень достоверности ($R^2 = 0,857$), на графике отмечается постепенное уменьшение контактной прочности при увеличении засоленности, при этом сохраняется трение минеральных частиц на контакте, что позволяет описывать процесс линейной функцией.

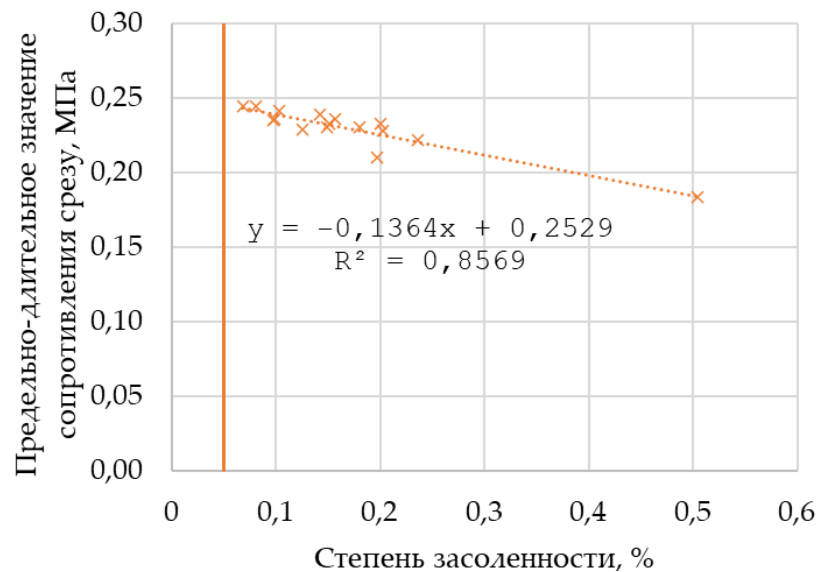


Рисунок 25 – Зависимость предельно длительного значения сопротивления срезу от степени засоленности для песка при температуре -3°C (линией отмечены границы засоленности согласно [24]) (составлено автором)

Иная зависимость наблюдается для дисперсных связных пород. Высокая дисперсность глинистых пород и наличие мелких пор увеличивают контакт с растворами солей, что ослабляет структурную прочность породы и разрушает цементирующие связи. Даже незначительная засоленность приводит к разрушению ледоцементных связей на контакте. Вследствие этого линейная аппроксимация дает значительную погрешность в зоне малых концентраций солей, что обусловило необходимость разработки уточненной нелинейной математической модели.

Для подтверждения физической природы нелинейного снижения прочности контакта был проведен анализ эквивалентного сцепления мерзлых пород, определенный методом шарикового штампа. Результаты исследования влияния засоленности на величину эквивалентного сцепления показаны на рисунке 26.

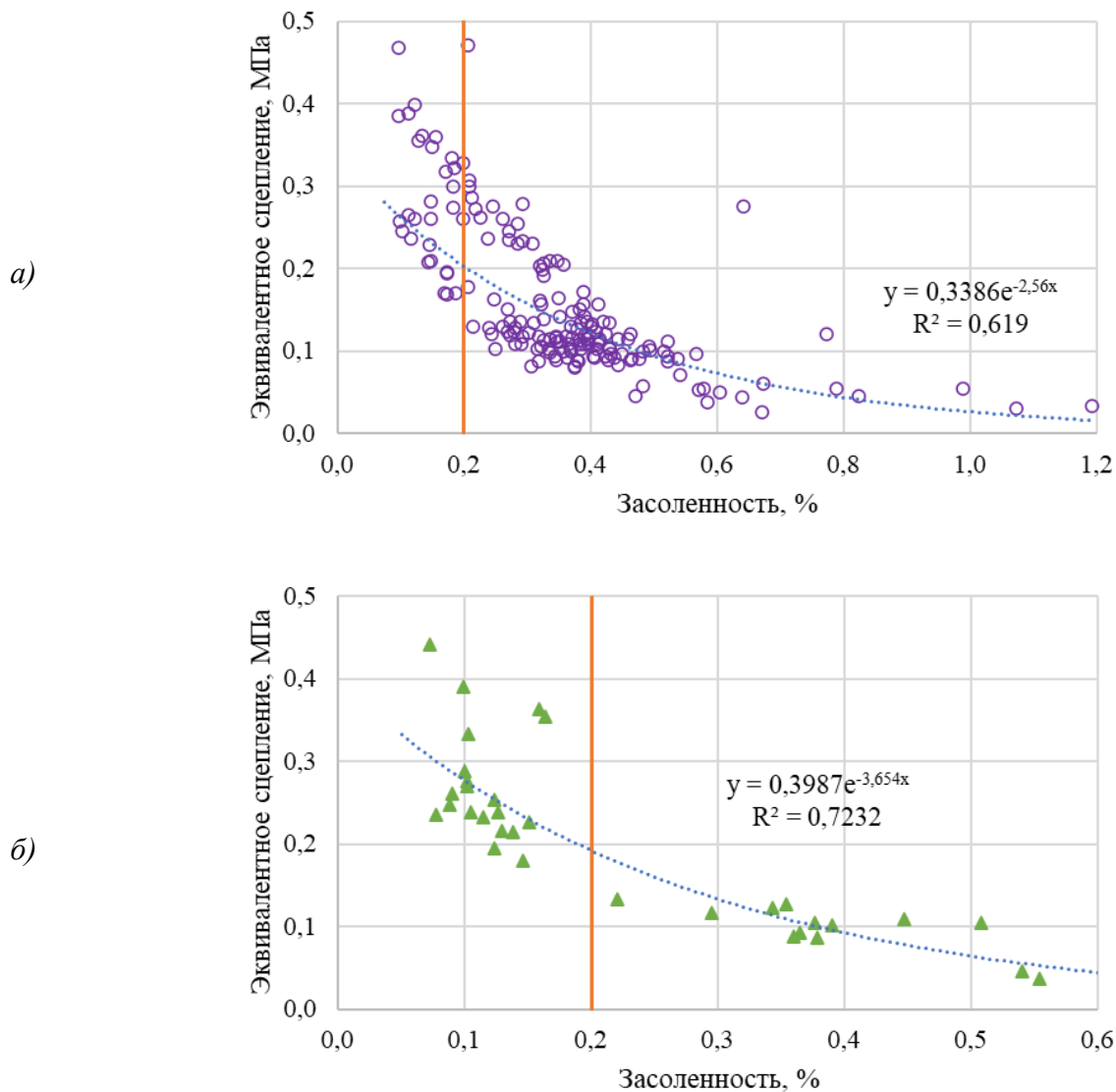


Рисунок 26 – Зависимость эквивалентного сцепления от степени засоленности пород при температуре -3°C (линией отмечены границы засоленности согласно [24]):
 а) глины; б) суглинка (составлено автором)

Для глинистых пород наблюдается резкое снижение прочности при увеличении засоленности в интервале от 0,1% до 0,4%. В этом диапазоне эквивалентное сцепление снижается в среднем с 0,4–0,45 МПа до 0,1–0,15 МПа, то есть в 3–4 раза. При засоленности выше 0,6% кривая выполаживается. Это может объясняться тем, что при низкой засоленности поровый раствор замерзает практически полностью, образуя прочные ледяные контакты, с ростом

засоленности концентрация солей в оставшейся жидкой фазе растет, что препятствует замерзанию всё большего объема воды и снижает прочность.

При этом для песков метод шарикового штампа показал, что даже при высокой степени засоленности (0,5%) эквивалентное сцепление остается на уровне 0,3–0,35 МПа. Таким образом, пески обладают крайне низкой чувствительностью прочностных характеристик к наличию солей, что делает невозможным описание связных и несвязных пород единым математическим законом.

Опираясь на выявленные закономерности, с целью повышения точности прогноза для связных пород п-ова Ямал была предложена нелинейная модель, описывающая прочность контакта степенной функцией (5):

$$R_{af} = \frac{R_0}{1 + k \cdot D_{sal}^\alpha}, \quad (5)$$

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 при фиксированной отрицательной температуре, МПа;

D_{sal} – степень засоленности пород, %.;

k – коэффициент, характеризующий интенсивность ослабления контактной прочности для конкретного литотипа при засолении;

α – показатель степени нелинейности, определяющий кривизну функции ослабления.

На рисунке 27 сплошными красными линиями показана аппроксимация экспериментальных данных по предложенной модели, пунктирными красными линиями – прогнозная кривая эквивалентного сцепления, полученная умножением модели на коэффициент структурного соответствия. Близость экспериментальных значений эквивалентного сцепления (C_{eq}), полученных методом шарикового штампа (серые ромбы) к этой линии подтверждает корректность модели.

Для связных пород (Рисунок 27) сплошная линия аппроксимации корректно описывает падение прочности в зоне малого засоления и выход на асимптоту при высоких значениях концентрации солей. Таким образом, установлено, что процессы деградации льдоцементационных связей как в объеме породного массива, так и на контакте со стальной свайей протекают по единому нелинейному закону, отличаясь масштабным коэффициентом.

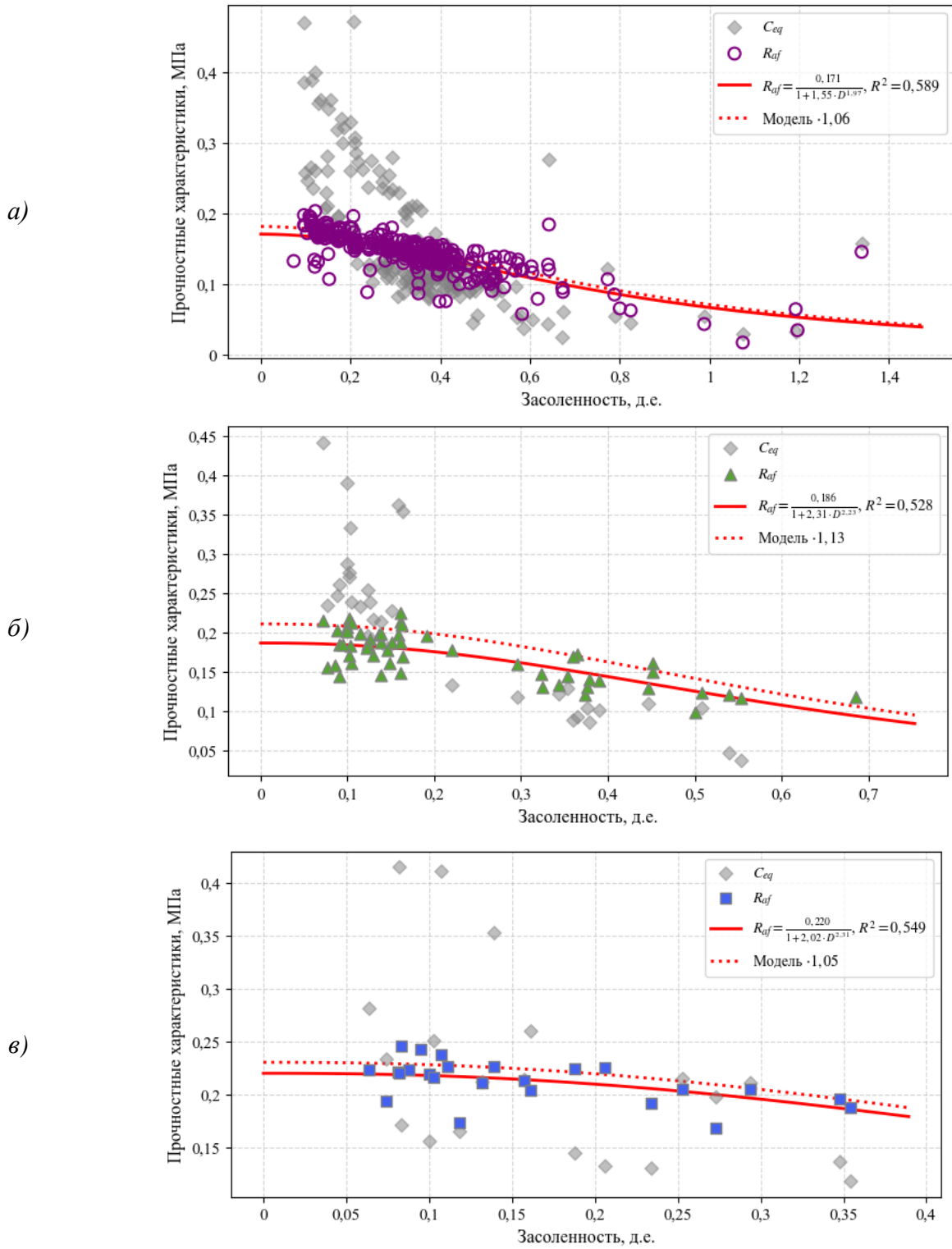


Рисунок 27 – Зависимость прочности смерзания (R_{sf}) и эквивалентного сцепления (C_{eq}) мерзлых пород от степени засоленности (D_{sal}) с аппроксимацией по предложенной нелинейной модели:

а) глины; б) суглинка; в) супеси (составлено автором)

Важнейшим аспектом работы свайных оснований в криолитозоне с сохранением мерзлого состояния является соотношение прочности сформированного контакта «свая-ММП». Для верификации этого параметра было проведено сопоставление прочности смерзания с эквивалентным сцеплением.

Отношение значения эквивалентного сцепления к прочности смерзания составляет для глин – 1,06, для супесей – 1,05, для суглинков – 1,13. Близость к единице доказывает, что в связных породах прочность контактной зоны практически равна внутренней прочности мерзлого массива. Это свидетельствует о формировании полноценной криогенной текстуры на границе раздела сред и позволяет использовать полученные параметры модели ослабления (k, α) непосредственно в геомеханических расчетах НДС свайных оснований.

2.3.2 Анализ изменения деформационных свойств мерзлых пород

Наряду с прочностными характеристиками, для оценки НДС основания технологических платформ необходимо определение модуля деформации. Компрессионные испытания были выполнены по методике, представленной в п. 2.1.2. В результате испытаний были получены графики зависимости деформации от прикладываемой нагрузки, использованные для нахождения модуля деформации мерзлых пород. Результаты компрессионных испытаний для мерзлых пород приведены на рисунке 28. Отмечено, что засоленные породы имеют более стабильные значения модуля деформации. Модуль деформации мерзлых засоленных пород (особенно глин и суглинков) в среднем выше, чем у незасоленных [11]. Уменьшение дисперсности пород сопровождается закономерным снижением модуля деформации. Так, модуль деформации засоленных песков может достигать 44 МПа, в то время как для засоленных глин этот показатель не превышает 14 МПа. Это может быть связано с влиянием солей на увеличение связности структуры мерзлых пород.

Далее было рассмотрено влияние фазового состава на деформационные характеристики. Для установления зависимости модуля деформации от физических свойств выбран параметр степени заполнения пор льдом и незамерзшей водой.

Зависимости модуля деформации, полученного в результате компрессионных испытаний, от степени заполнения пор льдом и незамерзшей водой для пород различного типа и степени засоленности представлены на рисунке 29. Хотя в анализе основное внимание уделяется влиянию заполнения пор льдом и незамерзшей водой, гранулометрическому составу и засоленности, следует признать, что эти факторы взаимодействуют с температурой, давлением и другими факторами, которые не изменялись в явном виде в этом анализе.

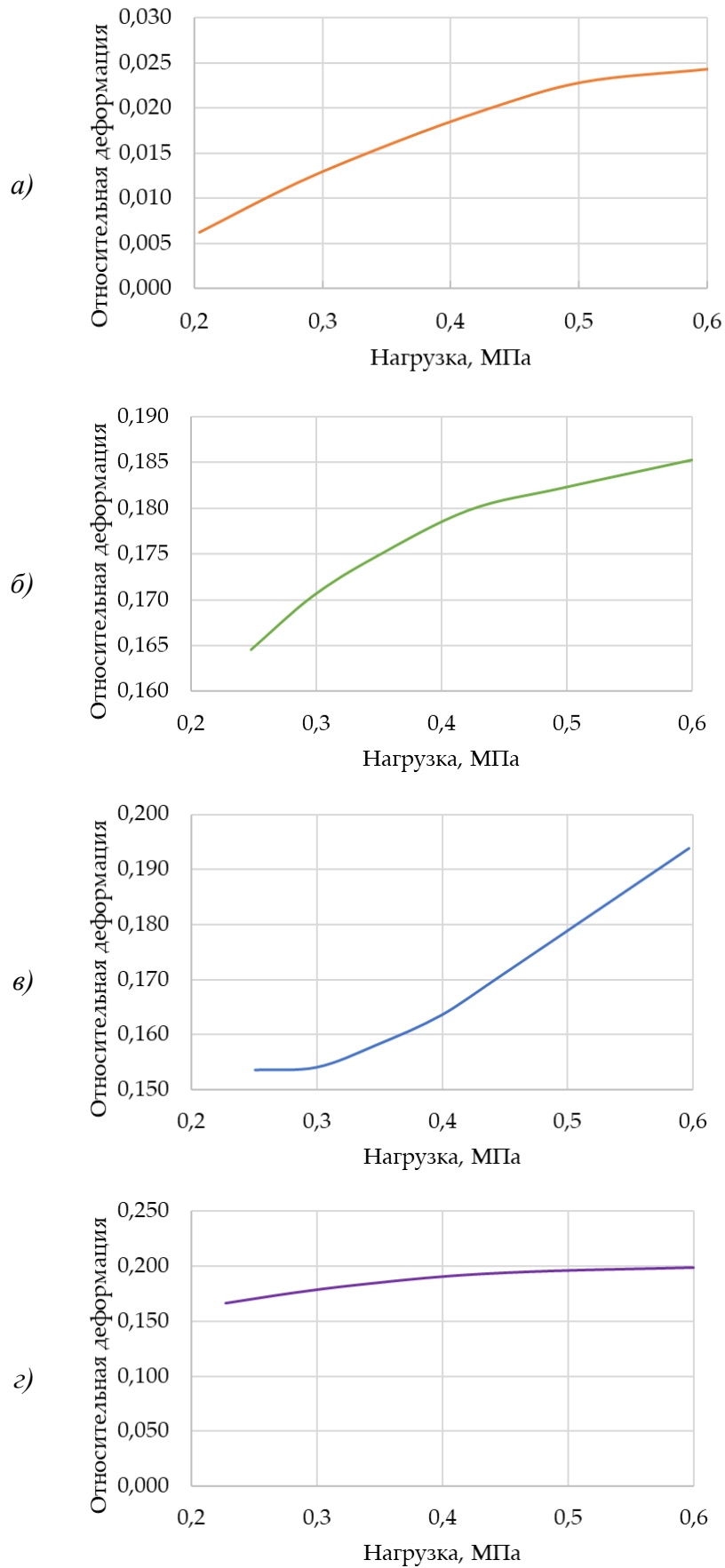
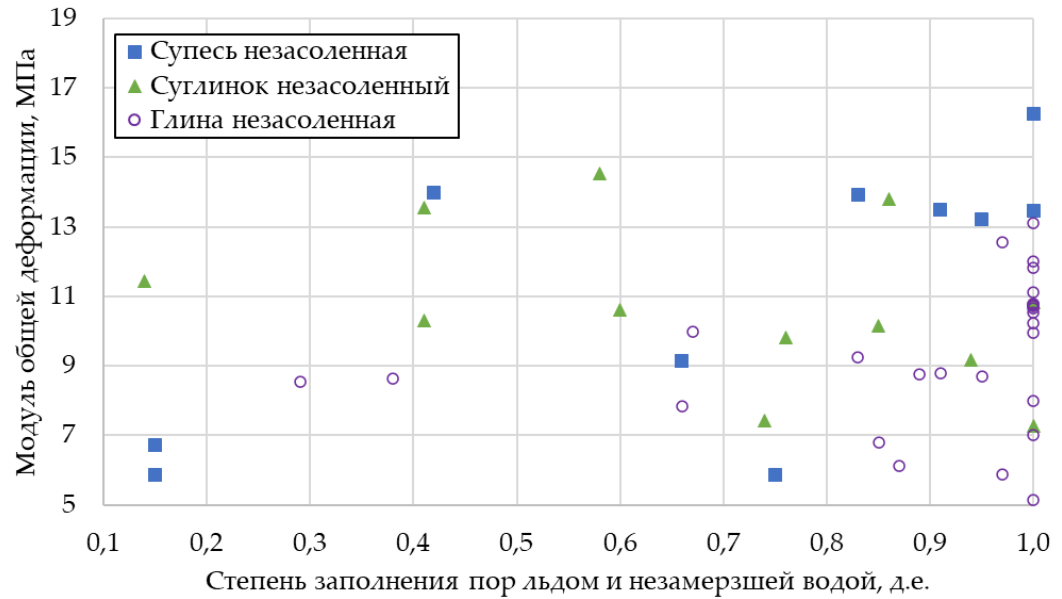
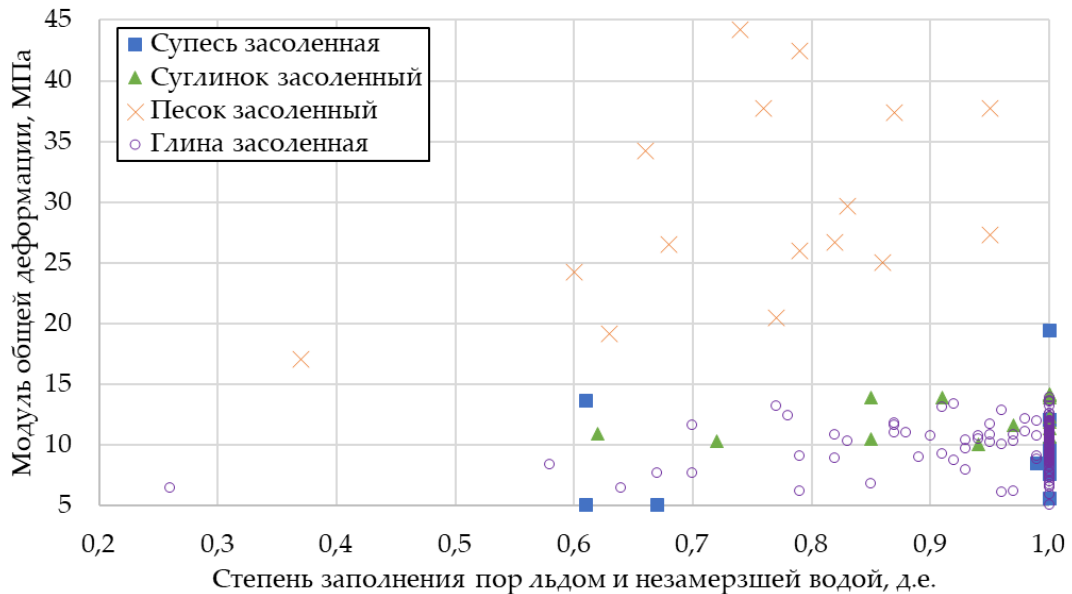


Рисунок 28 – График зависимости относительной деформации мерзлых пород от прикладываемой нагрузки при -3°C :
 а) песок; б) супесь; в) суглинок; г) глина (составлено автором)



а)



б)

Рисунок 29 – Зависимость модуля общей деформации от степени заполнения пор льдом и незамерзшей водой для (а) незасоленных и (б) засоленных многолетнемерзлых пород при температуре -3°C (составлено автором)

Анализ зависимости модуля общей деформации от степени заполнения пор льдом и незамерзшей водой (Рисунок 29) позволяет выявить ряд ключевых закономерностей, определяемых типом пород, дисперсностью и степенью засоленности. В целом для большинства исследованных пород прослеживается общая тенденция к увеличению модуля деформации по мере роста объема пор, заполненных льдом и незамерзшей водой. Наиболее ярко эта динамика выражена у песков, модуль которых возрастает на 74 % при изменении заполнения пор от 0,4 до 1,0, что обосновывает их высокие прочностные характеристики при любых вариациях льдистости. Глины демонстрируют более умеренный рост – примерно на 15 % при увеличении

степени заполнения с 0,26 до 1,0. Единственным исключением из правила выступают незасоленные суглинки, для которых характерна обратная зависимость: их модуль деформации снижается на 21 % при увеличении заполнения пор от 0,14 до 1,0.

Важным фактором, определяющим модуль деформации пород, является их дисперсность. Выявлена четкая закономерность планомерного снижения модуля деформации по мере уменьшения размера частиц в ряду: песок, супесь, суглинок и глина. Это объясняется тем, что крупные частицы песков и суглинков формируют стабильный структурный каркас, который эффективно противостоит нагрузкам даже в засоленном состоянии. В то же время мелкозернистая структура глин отличается значительным количеством пор, содержащих незамерзшую воду и лед, что в совокупности приводит к общему снижению модулю деформации.

Существенные различия наблюдаются в модуле общей деформации для засоленных и незасоленных пород. Незасоленные породы отличаются относительно невысокими значениями модуля общей деформации, варьирующимися в диапазоне от 5 до 16 МПа. При этом в незасоленных связных породах (супесях и суглинках) четкой прямой зависимости от льдистости не прослеживается, значения распределяются хаотично, а у глин при максимальном заполнении пор разброс показателей достигает 5–13 МПа. Такая картина свидетельствует о том, что прочность незасоленных пород в большей степени обусловлена их криогенной текстурой. В засоленных породах ведущую роль начинают играть гранулометрический состав и физико-химические свойства порового раствора. При этом значения модуля деформации засоленных супесей, суглинков и глин находятся в узком диапазоне 5–14 МПа. Это указывает на сниженное влияние фактора засоленности на итоговый разброс данных для этих типов пород. Полный диапазон изменения модуля общей деформации исследуемых мерзлых пород представлен в таблице 7.

Полученные данные свидетельствуют о критической важности учета не только гранулометрического состава, но и степени засоленности ММП при проектировании свайных оснований. Пренебрежение фактором засоленности может привести к существенному завышению расчетной несущей способности свай и, как следствие, к снижению работоспособности и устойчивости технологических платформ.

Таблица 7 – Диапазон изменения модуля общей деформации различных видов пород в зависимости от степени заполнения пор льдом и незамерзшей водой (по данным автора)

Тип пород	Песок	Супесь		Суглинок		Глина	
Засоленность	Засоленный	Незасоленная	Засоленная	Незасоленный	Засоленный	Незасоленная	Засоленная
Степень заполнения пор льдом и незамерзшей водой, д.с.	0,40 – 1,00	0,14 – 1,00	0,40 – 1,00	0,14 – 1,00	0,40 – 1,00	0,26 – 1,00	0,26 – 1,00
Минимум/Максимум модуля общей деформации, МПа	17,1/44,2	5,9/16,3	5,1/19,5	7,3/14,6	10,1/14,2	5,2/13,1	3,0/13,9
Диапазон модуля общей деформации, МПа	24,8-37,5	9,1-13,9	7,8-12,1	9,7-12,0	10,9-13,9	8,4-10,8	8,9-11,1

2.3.3 Анализ механизма контактного взаимодействия свайного основания технологических платформ

В целях углубленного анализа механизма контактного взаимодействия и разработки расчетной методики был проведен анализ связи между предельно длительным сопротивлением срезу и эквивалентным сцеплением, определенным экспресс-методом шарикового штампа.

На рисунке 30 представлены корреляционные поля экспериментальных данных с наложением разработанных аналитических моделей деформирования. Для подтверждения предложенной нелинейной модели был проведен корреляционный анализ связи между предельно-длительным значением сопротивлению срезу по поверхности смерзания и эквивалентным сцеплением, определенным методом шарикового штампа.

Сравнительный анализ позволил выявить зависимость контактной прочности от внутренней прочности мерзлых пород, определяемую литологическим типом и механизмом разрушения.

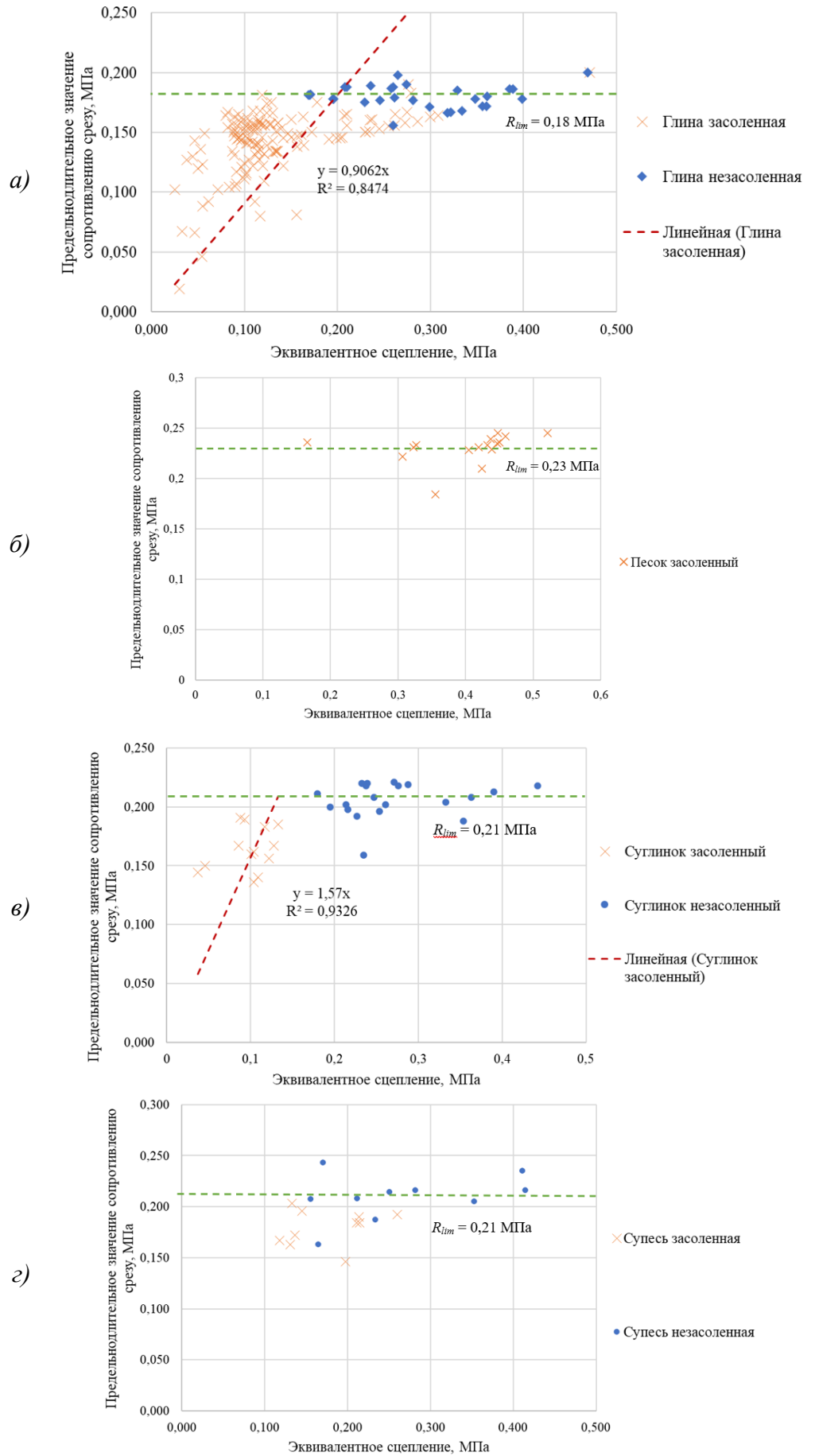


Рисунок 30 – Зависимость эквивалентного сцепления от предельно длительного значения сопротивлению срезу: а) глины; б) песка; в) суглинка; г) супеси (составлено автором)

Для несвязных пород установлено отсутствие значимой корреляции между внутренней прочностью массива и прочностью смерзания (Рисунок 30б, з). Значения сопротивления срезу формируют горизонтальное облако рассеяния, в то время как эквивалентное сцепление изменяется в широких пределах. Таким образом, в мерзлых несвязных породах разрушение происходит исключительно путем адгезионного срыва по контакту. Дальнейшее упрочнение массива не приводит к росту несущей способности сваи, которая ограничивается пределом адгезионной прочности

Иная картина наблюдается для засоленных связных пород (Рисунок 30а, в), наблюдается смена механизма разрушения. Корреляционное поле четко разделяется на две зоны: восходящую ветвь (когезионное разрушение по льдоцементационным связям для засоленных пород) и горизонтальное плато (адгезионный срыв для незасоленных пород).

Таким образом, выявлена зависимость прочности смерзания мерзлых пород с поверхностью сваи от их эквивалентного сцепления, определяемая видом разрушения: для связных дисперсных пород зависимость носит нелинейный логарифмический характер, отражающий когезионный тип разрушения, для песчанистых пород выявлен эффект стабилизации прочности смерзания, свидетельствующий о переходе к адгезионному срыву по контакту, предельное значение которого не зависит от дальнейшего упрочнения породного массива.

На основе полученных зависимостей для глин и суглинков предложена методика экспресс-оценки несущей способности свай в виде билинейной модели прочности с отсечкой (6):

$$R_{af} = \min(k \cdot C_{eq}; R_{lim}), \quad (6)$$

где R_{af} – предельно длительное значение сопротивления срезу по поверхности смерзания, МПа;

k – коэффициент эффективности сцепления;

C_{eq} – эквивалентное сцепление, МПа;

R_{lim} – предел адгезионной прочности.

Для аппроксимации восходящей ветви графика (область когезионного разрушения) использована линейная функция, проходящая через начало координат. Полученный коэффициент k характеризует степень трансформации внутренней прочности пород в сопротивление сдвигу по контакту с материалом сваи.

Анализ корреляционного поля для дисперсных связных пород подтверждает гипотезу о смене механизма разрушения и позволяет выделить две зоны деформирования. Для засоленных глин установлена высокая степень аппроксимации ($R^2=0,85$). Полученный угловой коэффициент указывает на то, что сопротивление сдвигу по контакту «свая-ММП» составляет около 91% от эквивалентного сцепления массива. Это свидетельствует о высокой эффективности реализации внутренней прочности пород через когезионные связи.

Для засоленных суглинков получена корреляция ($R^2 = 0,93$) с коэффициентом эффективности сцепления $k = 1,57$ и выявлен эффект остаточного структурного трения. При высоком засолении несущая способность на контакте сохраняется за счет трения частиц о шероховатую поверхность сваи. Превышение прочности смерзания над эквивалентным сцеплением указывает на то, что в суглинках адгезия порового льда и частиц скелета к поверхности сваи обеспечивает сопротивление сдвигу, превышающее сопротивление массива местному смятию (шариковому штампу).

В области незасоленных пород массив приобретает высокую внутреннюю прочность за счет ледоцемента и наблюдается стабилизация значений на уровне 0,15-0,21 МПа. Зависимости вырождаются в практически горизонтальные прямые, что соответствует предельной адгезионной прочности на границе контакта «свая-ММП». Дальнейшее упрочнение скелета породы не приводит к росту несущей способности сваи.

Обобщая полученные результаты, расчет предельно-длительного сопротивления срезу для связных пород п-ова Ямал может быть выполнен по следующим зависимостям (7):

$$R_{af} = \min(0,91 \cdot C_{eq}; 0,18); \quad (7)$$

для суглинков (8):

$$R_{af} = \min(1,57 \cdot C_{eq}; 0,21). \quad (8)$$

Выявленная закономерность доказывает необходимость применения нелинейной модели ослабления прочности для корректного прогноза НДС свайных оснований.

Необходимо подчеркнуть, что представленные результаты характеризуют состояние образцов при температуре -3 °С. Учитывая региональную специфику и выявленную чувствительность пород к наличию солей, полученные зависимости служат основой для разработки численных методов расчета свайных оснований в условиях Арктической зоны РФ.

2.4 Выводы по главе 2

На основе выполненного комплекса лабораторных исследований физических и деформационно-прочностных характеристик мерзлых пород, можно сформулировать следующие основные выводы:

1. В результате комплексных лабораторных исследований сформирован массив данных физико-механических свойств многолетнемерзлых дисперсных пород полуострова Ямал (380 образцов), характеризующийся широким диапазоном литологических разностей, льдистости и степени засоленности. Это обеспечивает статистическую достоверность полученных геомеханических зависимостей и позволяет использовать их в качестве основы для численного моделирования.

2. Установлено, что снижение предельно длительного сопротивления срезу по поверхности смерзания при засолении зависит от типа породы. Для несвязных пород (песков) ослабление описывается линейным законом. Для дисперсных связных пород (глин, суглинков, супесей) установлена и верифицирована нелинейная степенная зависимость.

3. Выявлена общая тенденция увеличения модуля деформации (на 15–74%) при росте степени заполнения пор льдом и незамерзшей водой, что объясняется упрочнением порового пространства, что необходимо учитывать при прогнозировании осадок технологических платформ.

4. Экспериментально доказано, что литологический состав и степень засоленности являются одними из ключевых факторов, определяющих несущую способность контактной зоны. Полученные эмпирические зависимости позволяют перейти к дифференцированному заданию параметров интерфейса в численных моделях, что исключает ошибки, связанные с использованием усредненных нормативных данных.

5. На основе сопоставительного анализа результатов испытаний методами одноплоскостного среза и шарикового штампа доказано наличие двух механизмов потери несущей способности системы «свая – породный массив»: когезионный тип, при котором прочность контакта линейно зависит от прочности массива; адгезионный тип, при котором достигается предел прочности смерзания льда с материалом свай, и дальнейшее упрочнение пород не приводит к росту несущей способности.

6. Разработана билинейная модель оценки удельных сил смерзания на основе эквивалентного сцепления. Предложенные аппроксимирующие зависимости для глин и суглинков позволяют исключить переоценку несущей способности свай и повысить точность расчетов.

7. Установленные закономерности прочностных, деформационных и теплофизических свойства получены для изотермических условий ($-3\text{ }^{\circ}\text{C}$) и служат физической основой для калибровки численной модели, которая в дальнейшем позволит прогнозировать НДС основания в широком диапазоне температурных воздействий.

ГЛАВА 3 ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВАЙНЫХ ОСНОВАНИЙ С ГРУНТОВЫМ И ПОРОДНЫМ МАССИВОМ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Результаты комплекса лабораторных испытаний доказали, что засоленность ММП оказывает значительное влияние на механизм разрушения по контактной поверхности смерзания. Для связных дисперсных пород выявлено нелинейное (степенное) падение предельно длительного сопротивления срезу, обусловленное деградацией ледоцементных связей.

Однако в натуральных условиях процесс формирования контактной прочности неразрывно связан с нестационарным температурным режимом массива. При устройстве буроопускных и буронабивных свай в скважину вносится значительное количество тепловой энергии, обусловленное экзотермической реакцией гидратации бетонной смеси. В сочетании со снижением температуры начала замерзания, характерной для засоленных пород, это приводит к существенному изменению кинетики обратного смерзания системы «свая-ММП».

Поэтому необходима разработка и верификация комплексной математической модели в программном комплексе Abaqus, позволяющая оценить влияние тепловыделения твердеющего бетона на сроки температурно-прочностной стабилизации контактной зоны и динамику набора несущей способности по боковой поверхности для различных литотипов засоленных пород.

3.1 Выбор и обоснование методики численного моделирования

Оценка напряженно-деформированного состояния и несущей способности свайных оснований в условиях криолитозоны требует решения сопряженной задачи. Классические аналитические методы не позволяют в полной мере учесть нестационарность процессов тепломассопереноса, выделение тепла гидратации при твердении бетонной смеси, а также нелинейный характер изменения прочностных характеристик мерзлых пород в процессе изменения температурного поля. В связи с этим принята методика, которая включает два взаимосвязанных этапа: теплофизическое моделирование в программном комплексе и последующий аналитический пересчет несущей способности свайного основания с применением авторских эмпирических моделей.

3.1.1 Обоснование выбора программного комплекса

Для решения поставленной задачи был выбран программный комплекс конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus. Выбор обусловлен широкими возможностями комплекса при решении нелинейных нестационарных задач теплопроводности с учетом скрытой теплоты фазовых переходов [56, 57]. В отличие от упрощенных инженерных методик, оперирующих осредненными температурами, Abaqus позволяет отслеживать кинетику температурного поля на границе «свая-массив» в каждый момент времени и на любом горизонте по длине свай, что

является критически важным условием для применения выявленных зависимостей контактной прочности.

3.1.2 Математическая формулировка термической задачи массива пород

При решении температурной задачи внутри рассматриваемого массива пород кондуктивный теплоперенос является преобладающим, в то время как конвективный теплообмен строго учитывается на верхней границе модели (поверхности земли) при взаимодействии с атмосферным воздухом. Скрытая теплота фазового перехода «вода-лед» является определяющим фактором нелинейности задачи.

Распространение тепла в массиве мерзлых пород описывается дифференциальным уравнением (9) [92, 140]:

$$C_{eq}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{eq}(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{eq}(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{eq}(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (9)$$

где T – температура массива пород, °С;

t – время, с;

$C_{eq}(T)$ – эквивалентная объемная теплоемкость породы, Дж/(м³·°С);

$\lambda_{eq}(T)$ – эквивалентная теплопроводность породы, Вт/(м·°С).

Поскольку процесс замерзания и оттаивания поровой влаги происходит не скачкообразно при одной температуре, а в определенном температурном интервале (особенно в засоленных породах), в модели применяется метод эквивалентной теплоемкости. Принимается, что основной объем фазовых переходов завершается в диапазоне температур от $T_m - \Delta T$ до $T_m + \Delta T$, где T_m – медианная температура фазового перехода, а ΔT – полуширина температурного интервала.

Согласно данному методу, эквивалентная объемная теплоемкость C_{eq} и эквивалентная теплопроводность λ_{eq} определяются как кусочно-заданные функции фазового состояния (10) и (11):

$$C_{eq}(T) = \begin{cases} C_f, & T < T_m - \Delta T \\ \frac{L_v}{2\Delta T} + \frac{C_f + C_u}{2}, & T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T \\ C_u, & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (10)$$

$$\lambda_{eq}(T) = \begin{cases} \lambda_f, & T < T_m - \Delta T \\ \lambda_f + \frac{\lambda_u - \lambda_f}{2\Delta T} [T - (T_m - \Delta T)], & T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T \\ \lambda_u, & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (11)$$

где C_f , C_u – объемная теплоемкость породы в мерзлом и талом состоянии соответственно, Дж/(м³·°С);

λ_f , λ_u – теплопроводность породы в мерзлом и талом состоянии соответственно, Вт/(м·°С);

L_v – скрытая теплота фазовых переходов на единицу объема породы, Дж/м³.

Опираясь на результаты исследований, изложенных во второй главе, в математическую модель было введено условие смещения температурного спектра фазовых переходов. Параметр T_m не является константой, а задается как функция от степени засоленности породы D_{sal} , что позволяет корректно моделировать кинетику остывания массивов с различной концентрацией порового раствора.

3.1.3 Математическая формулировка процесса тепловыделения свайного основания

Процесс формирования температурного поля внутри тела свайного основания с учетом экзотермической реакции гидратации бетона описывается следующим уравнением (12):

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_p \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_p \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v(t) \quad (12)$$

где C_p , λ_p – объемная теплоемкость и теплопроводность материала свайного основания;

$q_v(t)$ – удельная мощность внутреннего тепловыделения от гидратации цемента для одного кубического метра бетона, Вт/м³.

Закон выделения полного количества тепла в результате реакции гидратации бетона изменяется во времени и может быть представлен в виде (13):

$$Q(t) = Q_0(1 - e^{-mt}) \quad (13)$$

где Q_0 – полное тепловыделение 1 кг цемента при завершении гидратации, Дж/кг;

m – эмпирический коэффициент, зависящий от вида цемента и температуры твердения.

Удельная мощность тепловыделения $q_v(t)$, выступающая в качестве внутреннего источника тепла в расчетной модели, определяется как производная функции полного тепловыделения по времени с учетом рецептуры бетонной смеси (14):

$$q_v(t) = (W + K \cdot F) \frac{\partial Q}{\partial t} = (W + K \cdot F) \cdot m \cdot Q_0 \cdot e^{-mt} \quad (14)$$

где W – расход цемента в 1 м³ бетонной смеси, кг/м³;

F – количество минеральных добавок, кг/м³;

K – коэффициент приведения активности добавок к активности цемента.

Аналитическая зависимость была интегрирована в расчетную модель посредством задания функции объемного теплового потока, что позволило с высокой степенью достоверности симитировать тепловое воздействие твердеющего свайного основания на окружающий массив засоленных мерзлых пород.

3.1.4 Переход от термической задачи к геомеханической оценке несущей способности

Традиционный нормативный подход к расчету несущей способности сваи, регламентированный СП 25.13330.2020 [49], предполагает использование расчетных температур пород и табличных значений расчетных сопротивлений. Однако этот подход не позволяет оценить кинетику набора прочности в первые сутки и месяцы после устройства сваи, особенно в засоленных породах.

Для устранения этого недостатка в диссертации предложен и реализован алгоритм аналитического пересчета температурного поля, извлекаемого из узлов сетки Abaqus на контакте интерфейса, в несущую способность по боковой поверхности.

Предложенный алгоритм включает следующие шаги:

1. Для каждого временного шага Δt из модели Abaqus экстрагируется распределение температур вдоль боковой поверхности сваи $T(z, t)$.

2. На основе температуры и заданного уровня засоленности D_{sal} , для каждого узла массива определяется фазовое состояние контактной зоны.

3. Рассчитывается локальное предельно длительное сопротивление срезу $R_{af}(z, t)$ с использованием выявленных во второй главе моделей ослабления:

– Для связных дисперсных пород (глины, суглинки, супеси) применяется предложенная нелинейная степенная модель (5);

– Для несвязных пород (песков) применяется линейная модель (15):

$$R_{af} = R_0 - k \cdot D_{sal}. \quad (15)$$

Несущая способность сваи по боковой поверхности $F_{lat}(t)$ в любой момент времени определяется путем интегрирования локальных сопротивлений по площади контакта (16):

$$F_{lat}(t) = \pi \cdot d \int_0^L R_{af}(z, t) dz \quad (16)$$

где d – диаметр сваи, м;

L – длина сваи, м.

3.2 Построение геомеханических моделей и задание граничных условий термомеханического взаимодействия

Основной задачей является достоверное моделирование нестационарного процесса теплопередачи с учетом фазовых переходов поровой влаги и экзотермической реакции гидратации бетона [56]. Полученные температурные поля верифицировались по данным натурных наблюдений [31] для последующего использования в расчетах кинетики набора несущей способности свайного основания.

В связи с тем, что температурное поле вокруг одиночной сваи обладает цилиндрической симметрией, расчетная математическая модель была построена в осесимметричной постановке (Рисунок 31). Это позволило значительно повысить плотность конечно-элементной сетки в контактной зоне без избыточных вычислительных затрат.

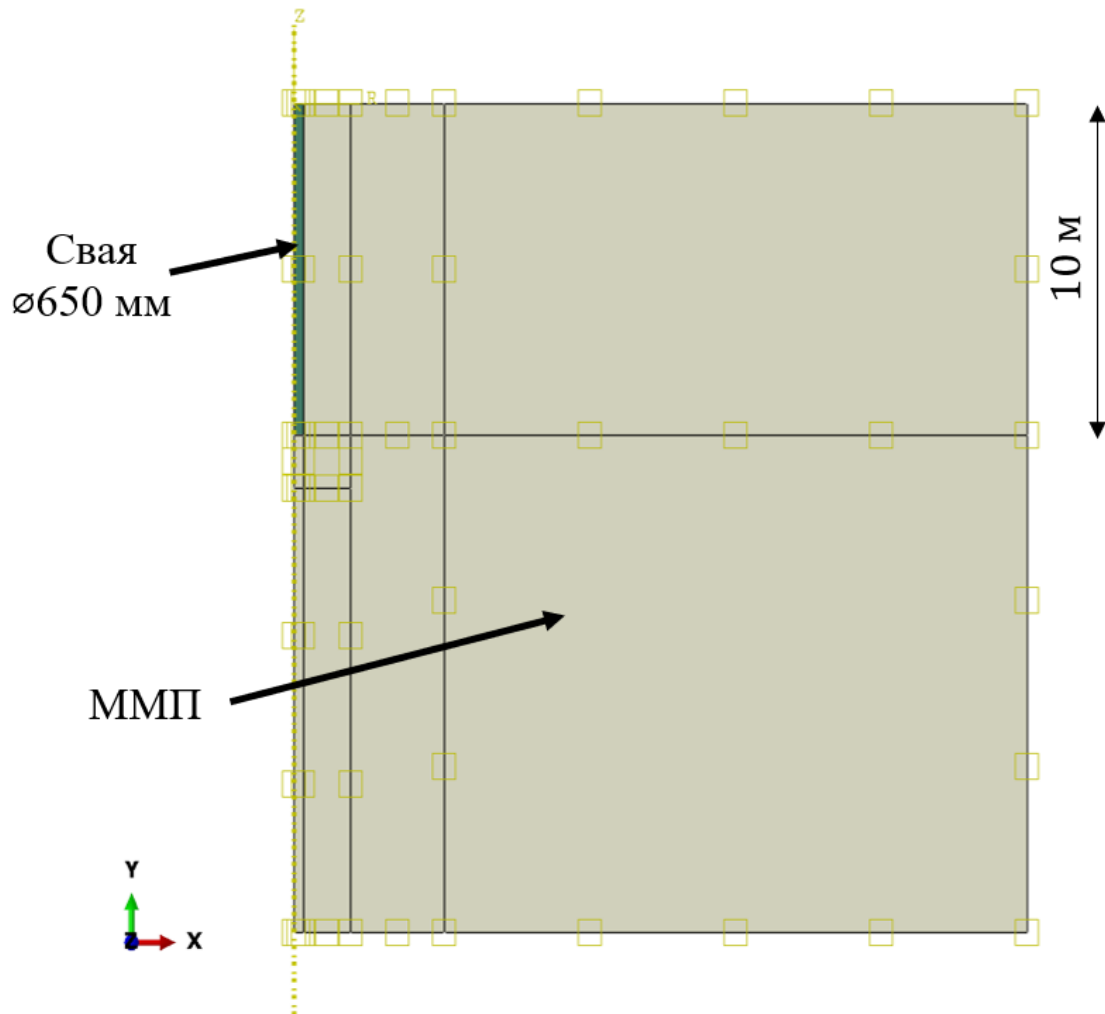


Рисунок 31 – Общий вид геомеханической модели системы «свая – породный массив» в осесимметричной постановке (составлено автором)

3.2.1 Геометрия модели и дискретизация

Геометрия модели включает в себя два основных компонента: массив мерзлых пород и свайное основание. Создана свая длиной 10 м и радиусом 0,325 м (диаметр 650 мм). Размеры породного массива по глубине и радиусу были выбраны с достаточным запасом для исключения влияния краевых эффектов на зону теплового взаимодействия (левая граница модели представляет собой ось симметрии).

Дискретизация расчетной области выполнена с использованием 8-узловых осесимметричных квадратичных элементов теплопередачи (тип DCAX8). Для обеспечения высокой точности фиксации фазовых переходов сетка конечных элементов была локально

сгущена в контактной зоне «свая-массив», так как именно в этой области возникают максимальные температурные градиенты в первые сутки после бетонирования скважины.

3.2.2 Свойства материалов

Для проведения серии численных экспериментов в модели были заданы теплофизические свойства для 12 различных литологических типов пород, базирующиеся на результатах проведенных лабораторных исследований: глины (4 степени засоленности), суглинки (3 вида), пески (3 вида) и супеси (2 вида).

Верификация модели осуществлялась на базовых свойствах незасоленной глины, заданных в виде температурно-зависимых функций. В частности, были приняты плотность 1644,0 кг/м³; теплопроводность 1,249 Вт/(м·°С) для талого и 1,471 Вт/(м·°С) для мерзлого состояний.

Для материала свайного основания задавались стандартные теплофизические характеристики бетона марки М400, представленные в таблице 8.

Таблица 8 – Характеристики материала свайного основания (по данным автора)

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·°С)
Бетон	2400	1,600	1000

При задании свойств в ПК Abaqus фазовый переход поровой влаги моделировался не скачкообразно, а через функцию эффективной скрытой теплоты, распределенной в узком температурном диапазоне. Для каждого литологического типа пород верхняя граница этого диапазона строго соответствовала экспериментально определенной температуре начала замерзания T_{bf} . Нижняя граница зоны интенсивных фазовых переходов принималась на 0,5...1,0°С ниже T_{bf} , что коррелирует с кривыми содержания незамерзшей воды для дисперсных пород [175]. Подход обеспечил высокую вычислительную стабильность решателя Abaqus и позволил физически достоверно описать кинетику поглощения тепловой энергии от гидратации бетона. Значение удельной теплоты корректировалось с учетом льдистости породы и составляло 75378 Дж/кг. Для засоленных пород весь комплекс физических и механических параметров пересчитывался индивидуально. Полный перечень теплофизических свойств для всех типов пород приведен в таблице 9.

Таблица 9 – Теплофизические характеристики мерзлых пород, принятые для численного моделирования (по данным автора)

Тип пород	Степень засоленности D_{sal} , %	Плотность ρ , кг/м ³	Температура начала замерзания T_{bf} , °C	Коэффициент теплопроводности в талом/мерзлом состоянии λ , Вт/(м·°C)	Удельная теплоемкость в талом/мерзлом состоянии c , Дж/(кг·°C)	Скрытая теплота L , Дж/кг
Глина	0,14	1644,0	-0,25	1,249/1,471	1911,8/1221,2	75378
	0,31	1725,8	-0,52	1,186/1,407	1748,5/1161,8	59329
	0,51	1727,2	-0,85	1,224/1,423	1764,3/1167,5	56681
	1,00	1788,3	-2,00	1,462/1,604	1630,7/1112,6	39380
Суглинок	0,12	1588,3	-0,22	1,314/1,559	1980,6/1245,6	102302
	0,34	1720,0	-0,37	1,156/1,378	2045,1/1286,0	75389
	0,52	1730,0	-0,92	1,161/1,372	1747,6/1162,3	60923
Супесь	0,10	1614,7	-0,20	1,208/1,470	1769,8/1164,1	91602
	0,23	1886,7	-0,60	1,266/1,454	1515,6/1065,2	52072
Песок	0,10	1805,0	-0,28	1,590/2,001	1446,4/1022,5	77126
	0,19	1828,6	-0,49	1,451/1,591	1551,2/1099,3	71704
	0,50	1820,0	-0,87	1,315/1,601	1606,8/1108,5	88125

3.2.3 Начальные и граничные условия

Начальные тепловые условия задавались через инструмент предопределенных полей. Начальная температура породного массива фиксировалась на -3°C , что соответствует естественной температуре мерзлой толщ для заданных инженерно-геокриологических условий.

Для внешних границ породного массива были приняты следующие условия:

На нижней и внешней (дальней правой) границах заданы жесткие температурные условия на отметке -3°C .

На верхней поверхности массива задано граничное условие конвективного теплообмена с коэффициентом теплоотдачи $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$. Для обеспечения максимальной достоверности температурных колебаний на верхней границе расчетной области (дневной поверхности) граничное условие конвективного теплообмена было привязано к амплитудно-временной характеристике. В модель был импортирован годовой климатический цикл полуострова Ямал, заданный в виде табличной функции времени (Таблица 10) [34]. Начало расчетного цикла ($t = 0$) было синхронизировано с февралем [31].

Таблица 10 – Динамика изменения температуры атмосферного воздуха в расчетной модели (по данным автора)

Месяц	Время, сут	Температура окружающей среды, °С
Февраль	0	-16,0
Март	31	-10,7
Апрель	61	-5,0
Май	92	+1,6
Июнь	123	+9,2
Июль	151	+13,8
Август	180	+10,8
Сентябрь	212	+6,5
Октябрь	242	-0,5
Ноябрь	273	-8,7
Декабрь	304	-12,5
Январь	334	-16,8
Февраль	365	-16,0

3.2.4 Моделирование технологической последовательности и экзотермии

Для физически корректной имитации технологической последовательности строительства применялся метод активации/деактивации элементов. На начальных этапах элементы свайного основания были исключены из расчета, что позволяло массиву прийти в температурное равновесие. На шаге «заливки бетона» элементы свай активировались с предписанной начальной температурой +20,6 °С (на основе данных натуральных экспериментов), после чего запускался процесс нестационарной теплопередачи.

Экзотермическая реакция гидратации цемента моделировалась как внутренний объемный источник тепла. Величина тепловыделения была задана в виде объемного теплового потока. Затухание интенсивности химической реакции во времени было реализовано посредством привязки величины теплового потока к табличной амплитуде на основе верифицированных литературных данных. Это позволило решателю корректно распределять выделяемую энергию на разогрев самого свайного основания и на оттаивание ММП в околоскважинной зоне.

Для точного отражения физико-химической стадии твердения бетона интенсивность внутреннего источника тепла была задана на основе верифицированных эмпирических данных [31] в виде табличной амплитуды (Таблица 11).

Заданная амплитудно-временная характеристика достоверно отражает все стадии гидратации бетона. Полное прекращение выделения технологического тепла в модели фиксируется к 44-м суткам. Подход гарантирует высокую точность расчета радиуса формирующегося вокруг свайного основания ореола протаивания пород.

Анализ выполнялся в рамках процедуры нелинейной нестационарной теплопередач). Шаг моделирования охватывал годовой период (31 536 000 секунд) от момента бетонирования до

полного обратного смерзания системы. Ввиду выраженной математической нелинейности задачи, обусловленной выделением и поглощением скрытой теплоты фазового перехода в крайне узком диапазоне температур, параметры инкрементации по времени строго контролировались. Максимально допустимое изменение температуры узлов за один инкремент было жестко ограничено величиной 0,1 °С. Условие гарантировало, что алгоритм не пропустит зону фазовых переходов при интегрировании, что является критически важным фактором для высокоточного вычисления радиуса образующегося ореола протаивания.

Таблица 11 – Интенсивность тепловыделения бетона во времени (по данным автора)

Время	Суммарное тепловыделение, Вт/м ³
0	180
1 час	66
6 часов	20
12 часов	302
24 часа	411
36 часов	418
2 суток	405
3 суток	170
7 суток	50
14 суток	25
28 суток	5
44 суток	0

3.2.5 Верификация расчетной модели

Целью этапа исследования являлась оценка адекватности разработанной конечно-элементной модели, описывающей тепловое взаимодействие твердеющего свайного основания с вмещающим массивом многолетнемерзлых пород.

В качестве эталонных данных для верификации были использованы результаты натуральных термометрических наблюдений за температурным режимом пород вблизи сваи, опубликованные в работе В. М. Ефимова [31]. Для сопоставления была выбрана контрольная точка на глубине 6,0 м по оси сваи, что позволяет минимизировать прямое влияние суточных колебаний температуры атмосферного воздуха на верхнем торце сваи. Согласно натурным данным, заливка бетонной смеси производилась в зимний период при температуре наружного воздуха -21,7 °С. Начальная температура бетонной смеси составила +20,1 °С.

Для численного воспроизведения процесса гидратации портландцемента в программном комплексе использовался инструмент задания объемного теплового потока. Динамика тепловыделения во времени задавалась с помощью пользовательской амплитудной кривой, эквивалентной кинетике экзотермической реакции твердеющего бетона. В процессе верификации модели решалась нелинейная теплотехническая задача с учетом скрытой теплоты

фазовых переходов поровой влаги при протаивании и последующем смерзании пород вокруг свай.

В ходе итерационной калибровки расчетной модели амплитуда тепловыделения была скорректирована для достижения соответствия трем ключевым физическим стадиям работы основания:

- Стадия начального теплообмена (0–12 часов) – резкое снижение температуры бетона за счет теплоотдачи в мерзлый массив до начала активной стадии гидратации;
- Экзотермическая стадия (1–2 суток) – период интенсивного тепловыделения бетона, сопровождающийся локальным повышением температуры свайного основания (до +8,9 °С) и формированием талого ореола в массиве пород;
- Стадия смерзания (14–28 суток) – процесс рассеивания тепла в окружающий массив, переход температуры тела свайного основания через 0°С и восстановление мерзлого состояния системы.

На рисунке 32 представлено сопоставление результатов численного моделирования с данными натуральных измерений.

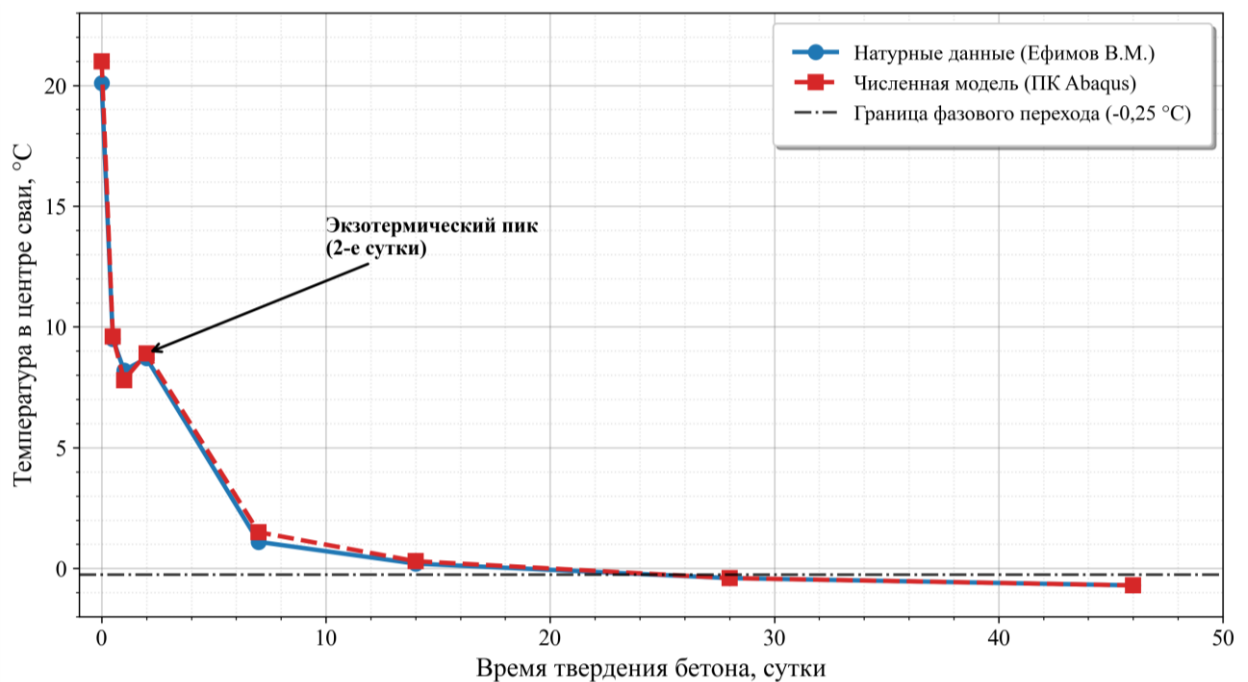


Рисунок 32 – Сопоставление результатов численного моделирования с данными натуральных измерений (составлено автором)

Для количественной оценки точности моделирования был проведен сравнительный анализ в ключевых временных точках (Таблица 12).

Таблица 12 – Сравнение натуральных и расчетных значений температуры в центре сваи (по данным автора)

Время	Значение по натурным данным, °С	Расчетное значение, °С	Абсолютное отклонение, °С
0 часов (заливка)	20,1	21,0	+0,9
12 часов	9,5	9,6	+0,1
1 сутки	8,2	7,8	-0,4
2 суток	8,7	8,9	+0,2
7 суток	1,1	1,5	+0,4
14 суток	0,2	0,3	+0,1
28 суток	-0,4	-0,4	0,0
46 суток	-0,7	-0,7	0,0

Анализ полученных результатов свидетельствует о высокой степени сходимости расчетной модели с физическим процессом в первые 46 суток. Именно в этот период происходит формирование талой зоны, основной набор прочности бетона и последующее обратное смерзание. Максимальное отклонение расчетных температур от натуральных на этапе фазового перехода (14–28 суток) не превышает 0,1 °С, что подтверждает корректность задания теплофизических характеристик массива и тепловой энергии от гидратации бетона. На этапе восстановления несущей способности (до 46 суток) расчетная модель демонстрирует практически идеальное совпадение.

3.3 Анализ результатов моделирования и выявление закономерностей термомеханического взаимодействия свайных оснований с породным массивом

В результате решения нестационарной тепловой задачи были получены динамические поля распределения температур в системе «свайное основание – мерзлый массив» для различных типов дисперсных пород с учетом вариации их степени засоленности. Анализ полученных данных позволил установить закономерности изменения теплового состояния и температурно-прочностной стабилизации контактной зоны.

3.3.1 Анализ формирования зоны растепления

Обобщение результатов численного моделирования показало, что внесение в массив технологического тепла неизбежно приводит к образованию кольцевой зоны растепления мерзлого массива вблизи сваи. Визуализация границ оттаивания для четырех литологических типов пород приведена на рисунке 33.

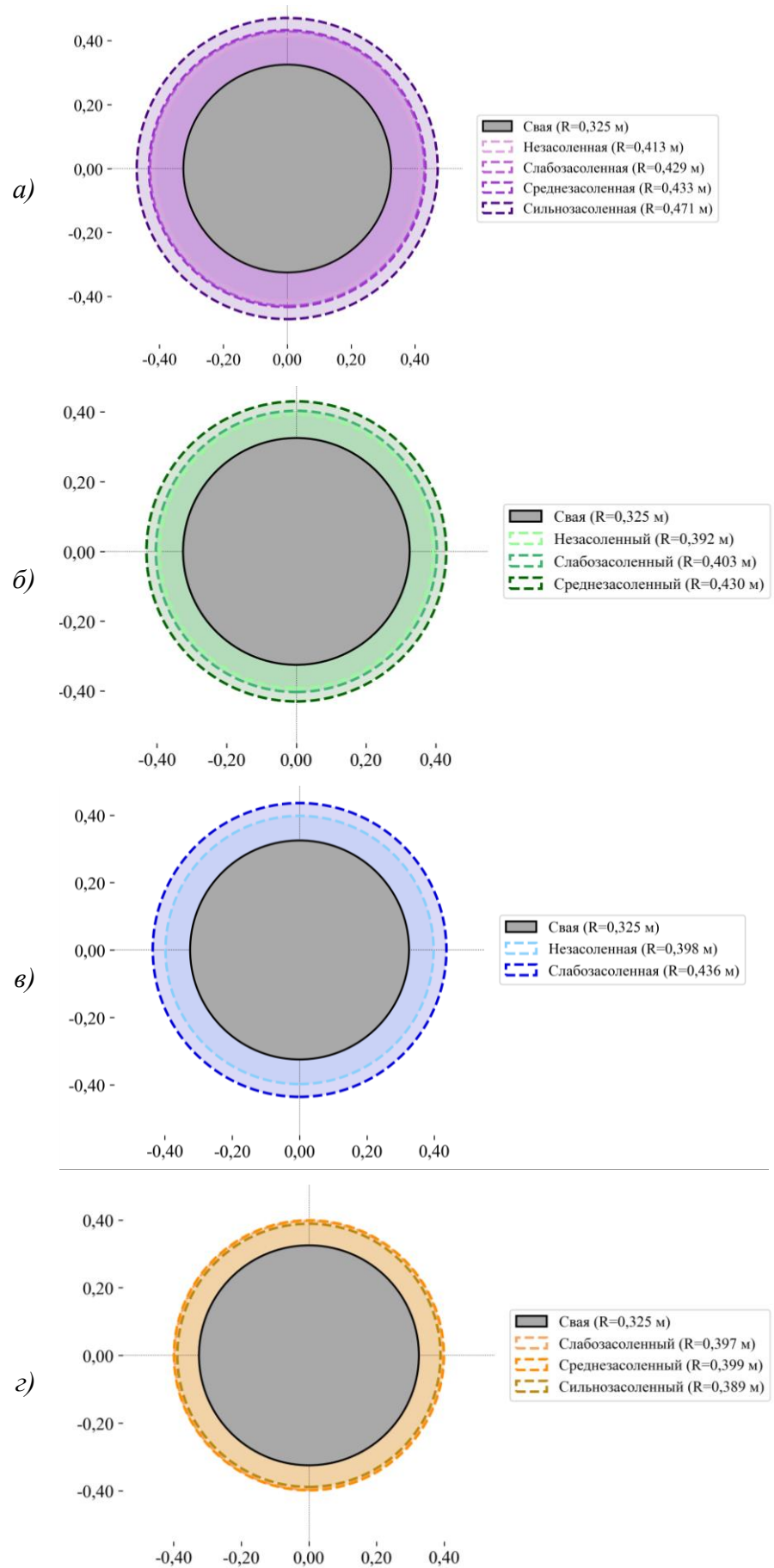


Рисунок 33 – Границы зоны растепления массива вокруг сваи для различных типов пород:
 а) глина, б) суглинок, в) супесь, г) песок (составлено автором)

Установлено, что внесение в массив технологического тепла приводит к образованию кольцевой зоны растепления, параметры которой существенно зависят от типа и засоленности пород. Сводные количественные данные по радиусам талого ореола представлены в таблице 13.

Как видно из представленных данных, совокупный эффект технологического тепловыделения и снижения температуры начала замерзания в засоленных породах приводит к закономерному расширению радиуса талой зоны. Для глинистых пород при увеличении засоленности от 0 до 1,5% отмечается прирост радиуса теплового влияния на 14% (с 0,413 до 0,471 м).

Таблица 13 – Параметры зоны растепления массива вблизи сваи (по данным автора)

Тип пород	Засоленность	Радиус растепления, м	Прирост радиуса талой зоны, %	Прирост площади растепленной породы, %
Глина	Незасоленная	0,413	0,0	0,0
	Слабозасоленная	0,429	3,9	20,7
	Среднезасоленная	0,433	4,8	26,1
	Сильнозасоленная	0,471	14,0	78,9
Суглинок	Незасоленный	0,392	0,0	0,0
	Слабозасоленный	0,403	2,8	18,2
	Среднезасоленный	0,430	9,7	65,0
Супесь	Незасоленная	0,398	0,0	0,0
	Слабозасоленная	0,436	9,5	60,0
Песок	Слабозасоленный	0,397	0,0	0,0
	Среднезасоленный	0,399	0,5	3,1
	Сильнозасоленный	0,389	-2,0	-12,1

Несмотря на относительно небольшие абсолютные значения прироста радиуса (порядка 0,06 м), изменения носят существенный характер. Переход от линейного радиуса к площади сечения зоны теплового влияния показывает, что площадь зоны фазовых переходов возрастает практически на 30% (с 0,536 м² до 0,697 м²). Более того, анализ площади непосредственно растепленной породы без учета площади сечения самой сваи доказывает, что объем растепленного массива вокруг сваи в сильнозасоленной глине увеличивается на 78,9 % по сравнению с незасоленной.

При проектировании кустового расположения свайных оснований с шагом в три диаметра, подобное расширение ореола теплового влияния приводит к существенному сокращению перемычки мерзлой породы между соседними сваями. Это является значимым фактором оценки взаимного теплового влияния конструкций и требует учета при назначении технологического шага бурения.

Специфический эффект выявлен при моделировании сильнозасоленных песков: зафиксировано незначительное снижение радиуса зоны растепления (-2,0%). Феномен может объясняться их особыми теплофизическими свойствами. Из-за низкой температуры начала замерзания и минимального исходного содержания льда-цемента, тепловая энергия гидратации расходуется преимущественно на кондуктивный прогрев минерального скелета массива, а не на поглощение скрытой теплоты фазовых переходов, что размывает границы зоны протаивания по сравнению со связными дисперсными породами.

Таким образом, установлено, что экзотермический эффект твердения бетона в сочетании со снижением температуры начала замерзания засоленных пород приводит к формированию вокруг свайного основания кольцевой зоны растепления радиусом от 0,38 до 0,47 м. Процесс набора прочности смерзания в этой зоне носит существенно нелинейный характер, а его время может превышать нормативное время набора прочности бетона в 3–5 раз, что рассмотрено далее.

3.3.2 Закономерности температурно-прочностной стабилизации контактной зоны «свайное основание – мерзлый массив»

Анализ теплового взаимодействия свайного основания с мерзлым массивом требует оценки динамики температурного поля во времени. Распределение температурного режима на контакте для различных литологических типов пород представлено на рисунках 34, 35.

Рисунок наглядно демонстрирует термодинамическую закономерность – повышение концентрации порового раствора приводит к смещению спектра фазовых переходов в область более низких температур. На начальном этапе (до 10–15 суток) наблюдается резкий скачок температуры (до +3°C), вызванный рассеиванием тепла гидратации бетона. Далее кривые выходят на пологое плато, длительность которого определяется затратами энергии на обратную кристаллизацию поровой влаги.

Как видно из графиков, для сильнозасоленных связных пород (красные кривые) процесс преодоления температуры начала замерзания (маркер ○) затягивается на десятки суток, в то время как достижение расчетной температуры эксплуатации (маркер □) может превышать 150 суток.

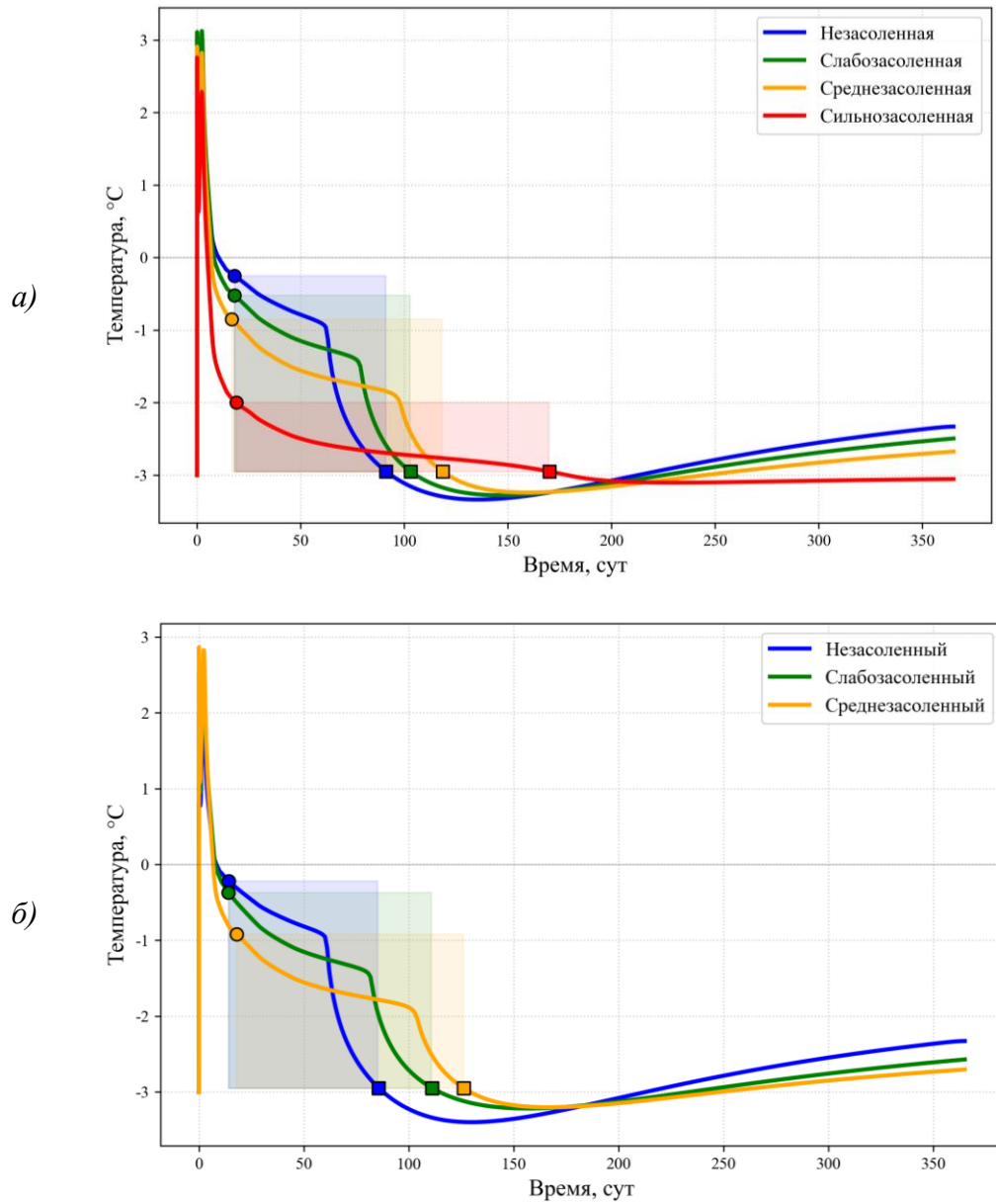


Рисунок 34 – Зависимость температуры на контакте «свайное основание – мерзлый массив» от времени для различных типов пород при различной засоленности: *а)* глина, *б)* суглинок; \circ – температура начала замерзания; \square – температура испытания на сдвиг по поверхности смерзания (составлено автором)

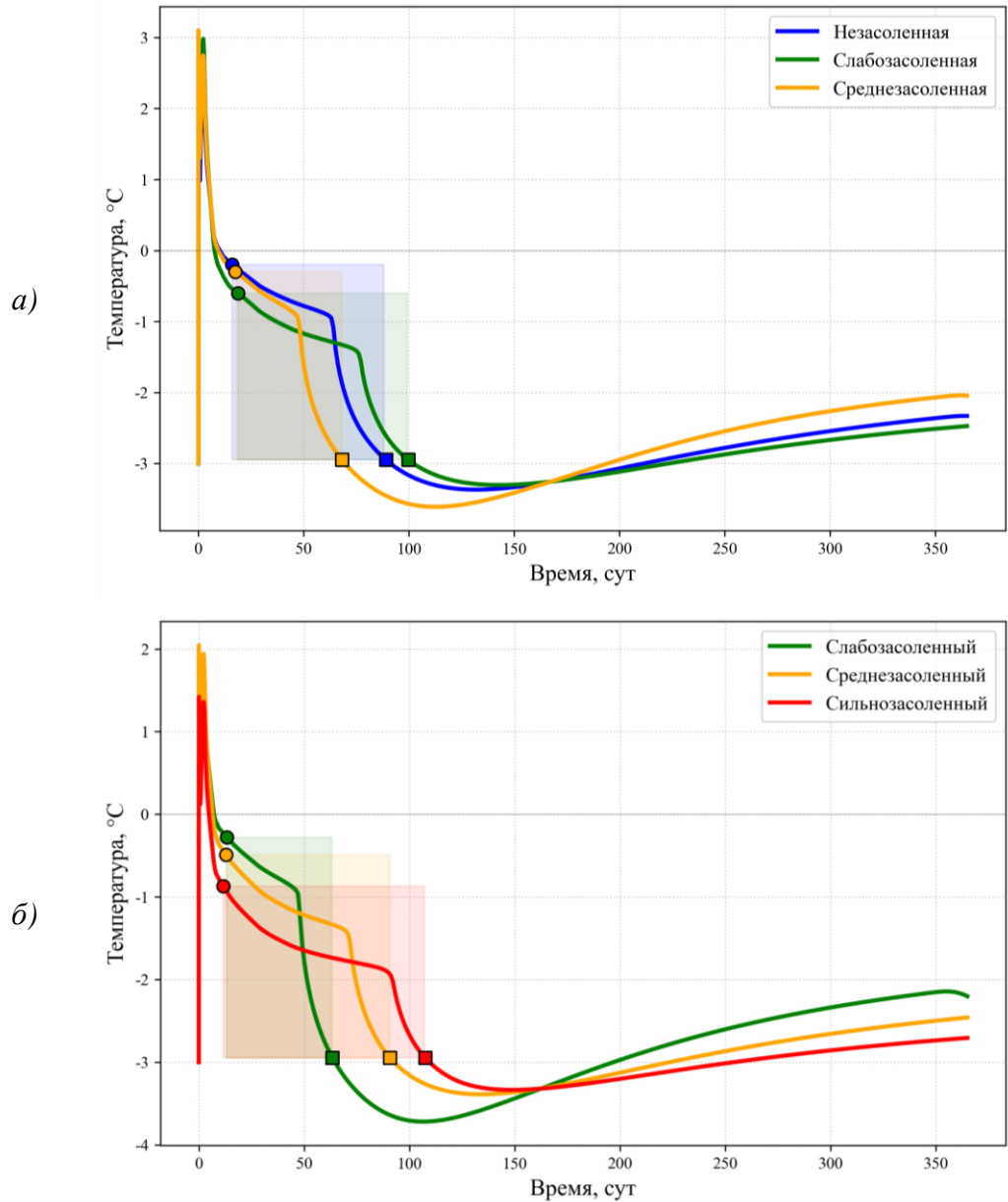


Рисунок 35 – Зависимость температуры на контакте «свайное основание – мерзлый массив» от времени для различных типов пород при различной засоленности: а) супесь, б) песок; ○ – температура начала замерзания; □ – температура испытания на сдвиг по поверхности смерзания (составлено автором)

Для перехода от полученных температурных полей к параметрам несущей способности массива использован комплексный подход. Базовые расчетные сопротивления мерзлых незасоленных пород сдвигу по поверхности смерзания R_{af} принимались в зависимости от установившейся температуры согласно справочным данным (Таблица 14) [49].

Таблица 14 – Расчетные сопротивления мерзлых незасоленных грунтов сдвигу по поверхности смерзания [49]

Грунты	Расчетные сопротивления R_{af} , кПа, при температуре грунта, °C									
	-0,3	-0,5	-1	-1,5	-2	-2,5	-3	-3,5	-4	-6
Глинистые	40	60	100	130	150	180	200	230	250	300
Песчаные	50	80	130	160	200	230	260	290	330	380

Для учета выявленного ранее эффекта снижения контактной прочности в засоленных породах, базовые нормативные значения R_{af} корректировались с использованием предложенной нелинейной модели ослабления (5). Поскольку несущая способность под нижним концом сваи (в силу доказанного во II главе сохранения модуля деформации массива E) формируется практически независимо от сроков восстановления фоновой температуры, для оценки влияния технологических факторов рассматривался процесс набора прочности изолированно по боковой поверхности.

Для корректного перехода от локальных эпюр контактного сопротивления к общей несущей способности сваи расчет производился в соответствии с формулой (7.2) СП 25.13330 [49]. Интегрирование касательных напряжений выполнялось по площади смерзания A_{af} для сваи диаметром 0,65 м и рабочей длиной 10 м. Результатом интегрирования стала комплексная оценка изменения несущей способности по боковой поверхности (F_{lat}) во времени (Рисунки 36, 37).

На представленных графиках пунктирными линиями показано изменение температурного поля $T(t)$ на контакте сваи и массива. Четко прослеживается температурный пик в первые сутки с последующим асимптотическим остыванием до фоновой температуры -3°C . Сплошными линиями отражен процесс набора несущей способности по боковой поверхности $F_{lat}(t)$. Графики наглядно демонстрируют, что начало набора прочности F_{lat} смещено во времени относительно момента бетонирования, причем величина этого смещения прямо пропорциональна степени засоленности D_{sat} .

Особый научно-практический интерес представляет анализ состояния системы на 28-е сутки (вертикальная пунктирная линия на графиках) – момент достижения бетоном проектной марочной прочности, который в традиционной строительной практике часто рассматривается как допустимый срок начала нагружения конструкций.

Установлено, что при слабой засоленности (0,14 %) на 28-е сутки свая уже набирает около 320 кН несущей способности по боковой поверхности. Однако для сваи в сильнозасоленной глине (1,00 %) на этот же срок несущая способность значительно ниже и составляет около 100 кН. Начало включения боковой поверхности в работу происходит примерно на 20-е сутки, однако последующий набор несущей способности носит затяжной характер.

Процесс тепло-прочностной стабилизации в песчаных массивах протекает существенно интенсивнее. Благодаря меньшему объему льда-цемента и, как следствие, сниженным затратам на скрытую теплоту фазовых переходов, песок с наибольшей из представленных засоленностью (0,50 %) на 28-е сутки способен обеспечить несущую способность около 450 кН.

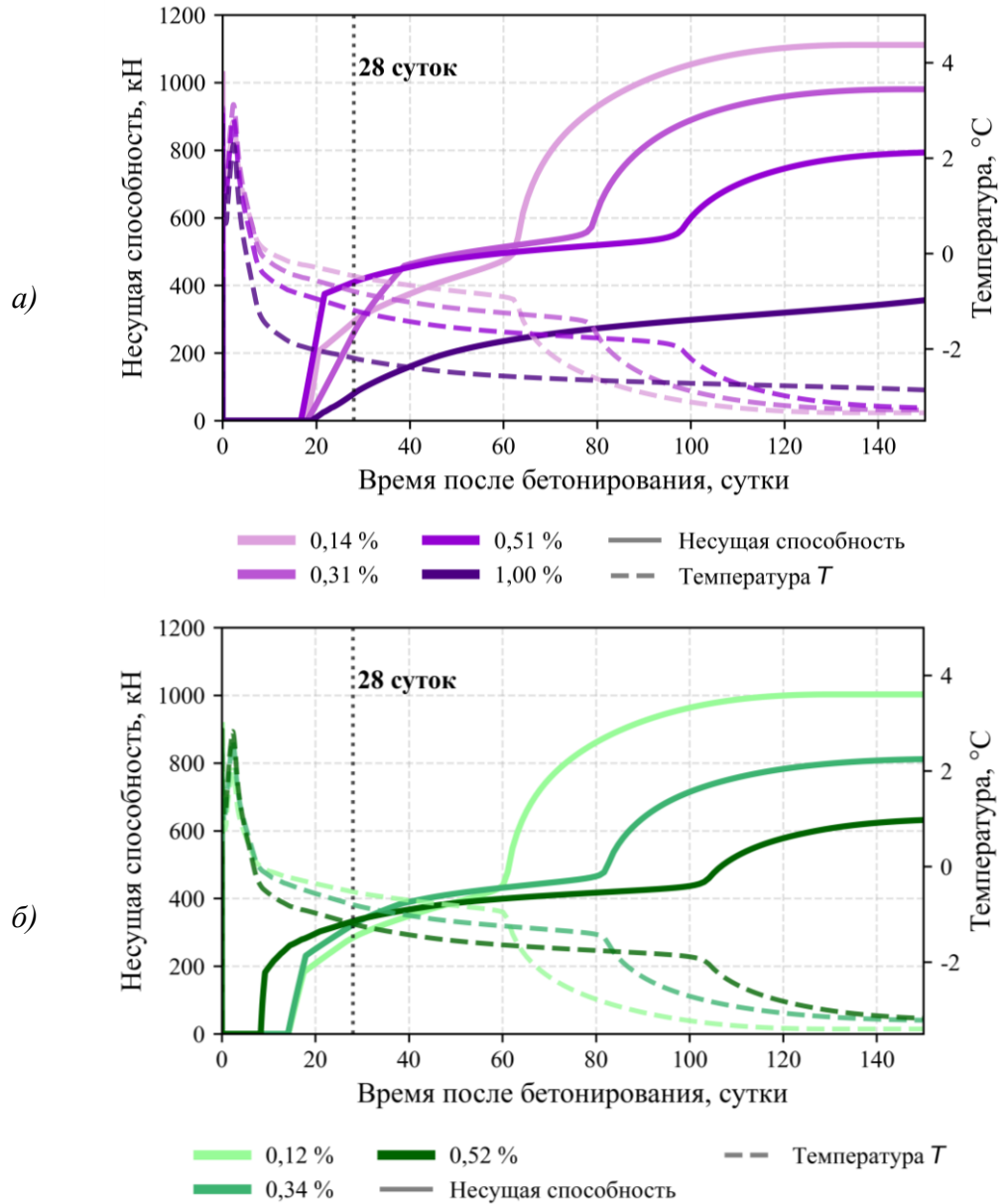


Рисунок 36 – Влияние засоленности на кинетику температурно-прочностной стабилизации контактной зоны: а) глина, б) суглинок (составлено автором)

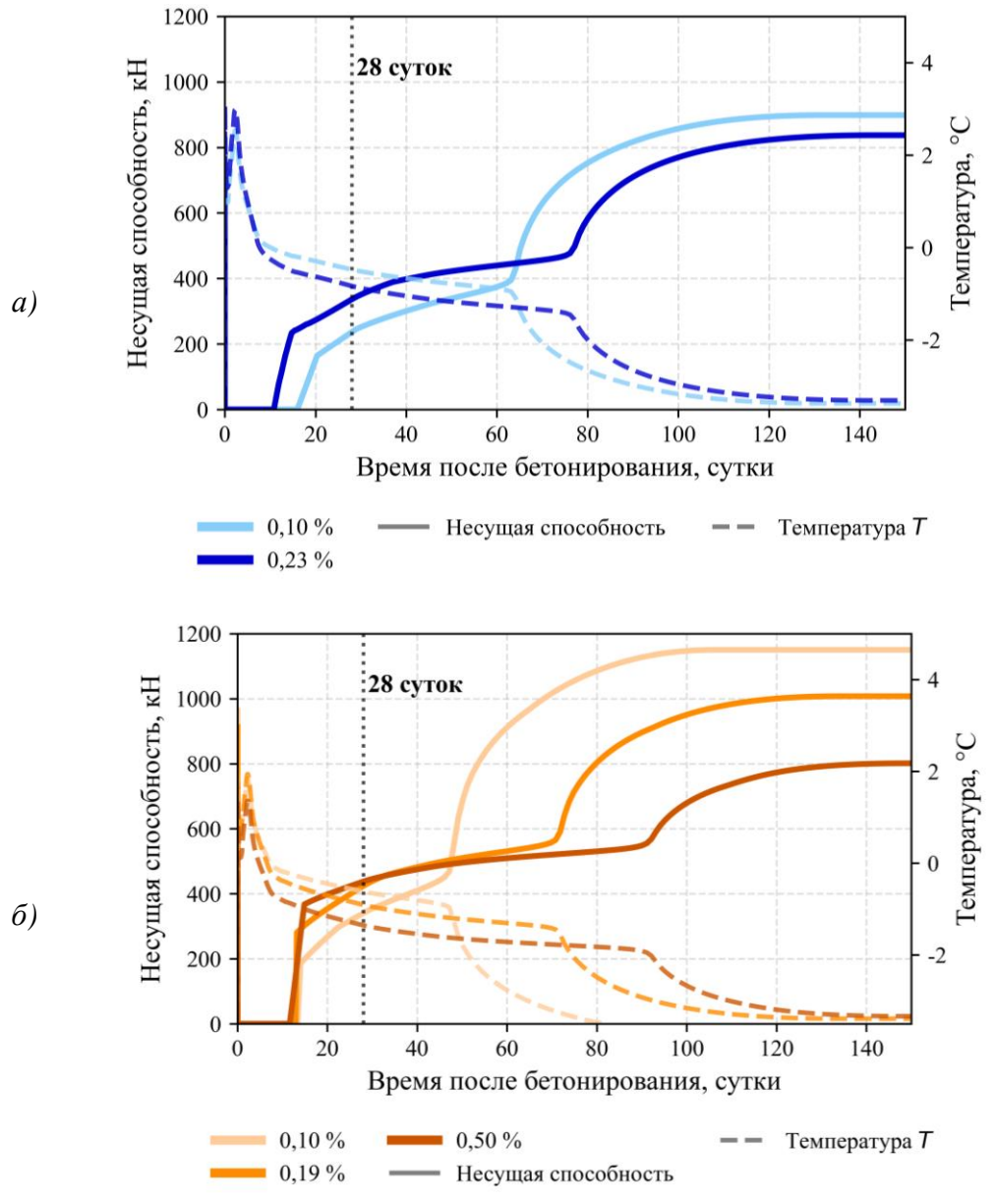


Рисунок 37 – Влияние засоленности на кинетику температурно-прочностной стабилизации контактной зоны: а) супесь, б) песок (составлено автором)

Это доказывает необходимость индивидуального геомеханического подхода к оценке сроков безопасного нагружения технологических платформ.

Анализ расчетных кривых остывания позволил определить длительность достижения массивом температуры начала замерзания и последующего набора полной прочности смерзания (t_{rec}). Установлено, что время набора полной прочности смерзания t_{rec} не является линейной функцией засоленности и описывается предложенной аналитической степенной функцией (17):

$$t_{rec} = t_{base} + k_{ph} \cdot D_{sal}^{\alpha} \quad (17)$$

где t_{base} – время, необходимое для набора полной прочности смерзания для незасоленных пород данного типа с учетом рассеяния тепла бетона, сут;

k_{ph} и α – эмпирические коэффициенты активности фазовых переходов;

D_{sal} – степень засоленности, %.

Параметры предложенной математической модели для исследуемых типов пород обобщены и представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Параметры стабилизации НДС контактной зоны (по данным автора)

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

Для практического применения разработана номограмма набора прочности смерзания свайных оснований (Рисунок 38). Разработанная математическая модель позволяет выделить четыре зоны формирования несущей способности на контакте «свая-ММП»:

- I зона – талое состояние (отсутствие прочности смерзания, $F_{lat} \approx 0$);
- II зона – начало формирования ледоцементных связей, температура опускается ниже температуры начала замерзания T_{bf} ;
- III зона – активная фаза льдообразования, нелинейный, экспоненциальный набор прочности;
- IV зона – достижение полной прочности смерзания, выход несущей способности на плато, индивидуальное для каждого типа пород).

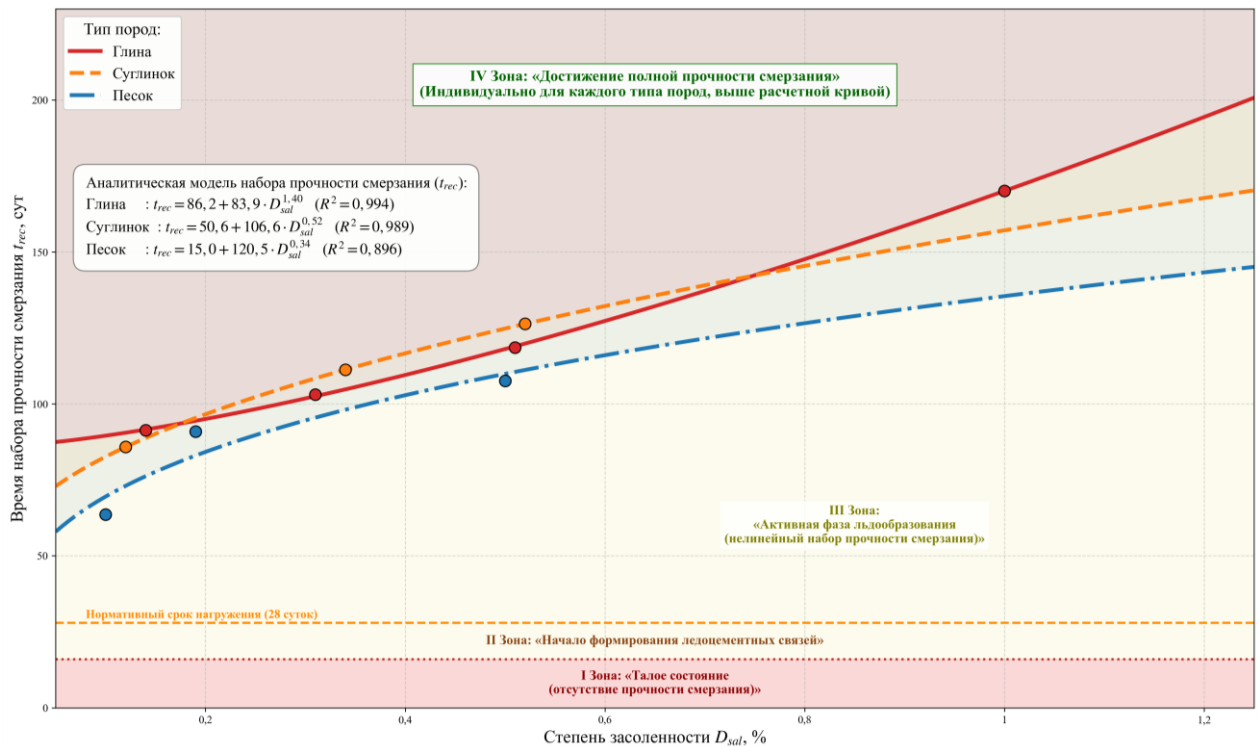


Рисунок 38 – Номограмма прогноза времени температурно-прочностной стабилизации контактной зоны (составлено автором)

Анализ параметров модели (Таблица 15) и построенной номограммы (Рисунок 38) подтверждает, что для глин даже в незасоленном состоянии требуется значительное время на

температурную стабилизацию ($t_{base} = 86,2$ сут), что связано с их высокой влагоемкостью и большим объемом скрытой теплоты кристаллизации. При наличии засоления это время возрастает нелинейно (показатель степени $\alpha = 1,40$). Для песков процесс стабилизации протекает значительно быстрее ($t_{base} = 15,0$ сут), а влияние засоления носит более сглаженный характер ($\alpha = 0,34$).

Выявленное снижение прочности по боковой поверхности на ранних сроках эксплуатации служит прямым геомеханическим обоснованием эффективности применения запатентованного способа сооружения свай с пробкой-пятой, способных воспринимать вертикальную нагрузку при сниженной несущей способности по боковой поверхности.

3.3.3 Несущая способность свайного основания во времени

Для перехода от результатов лабораторных испытаний, полученных при фиксированной температуре, к расчету несущей способности в нестационарном тепловом поле в работе применен следующий алгоритм: поскольку физическая природа сопротивления сдвигу как в пресных, так и в засоленных породах одинакова и определяется прочностью льдоцементационных связей, термодинамический и физико-химический факторы разделяются. Расчет текущего сопротивления сдвигу $R_{af}(t)$ на каждом временном шаге определялся выражением (18):

$$R_{af}(t) = R_{base}(T(t)) \cdot K_{deg}(D_{sal}) \quad (18)$$

где $R_{base}(T(t))$ – базовая температурная зависимость прочности смерзания, отражающая термодинамическое восстановление льдоцемента при остывании (аппроксимируется по нормативным данным для незасоленных пород, Таблица 14);

$K_{deg}(D_{sal})$ – безразмерный коэффициент физико-химического снижения прочности, определяемый по разработанным автором нелинейным (для связных) (6) и линейным (для несвязных) (15) моделям ослабления.

Это позволило корректно масштабировать влияние засоления на весь процесс. Коэффициент K_{deg} , достоверно установленный для эксплуатационной температуры (-3 °C), выступает в роли функции ослабления структурных связей, не зависящей от текущего этапа остывания, что позволяет получить непрерывное поле решений во времени.

Для количественной оценки набора несущей способности во времени введено понятие интенсивности набора несущей способности $U_{af}(t)$. Параметр отражает долю (в процентах) набранной несущей способности по боковой поверхности в момент времени t по отношению к проектной несущей способности F_{lat}^{max} , достигаемой при полном восстановлении температурного поля (при $t \rightarrow \infty$) (19):

$$U_{af}(t) = \frac{F_{lat}(t)}{F_{lat}^{max}} \cdot 100\% \quad (19)$$

Сравнительный анализ процесса набора несущей способности $U_{af}(t)$ для различных типов дисперсных пород представлен на рисунке 39.

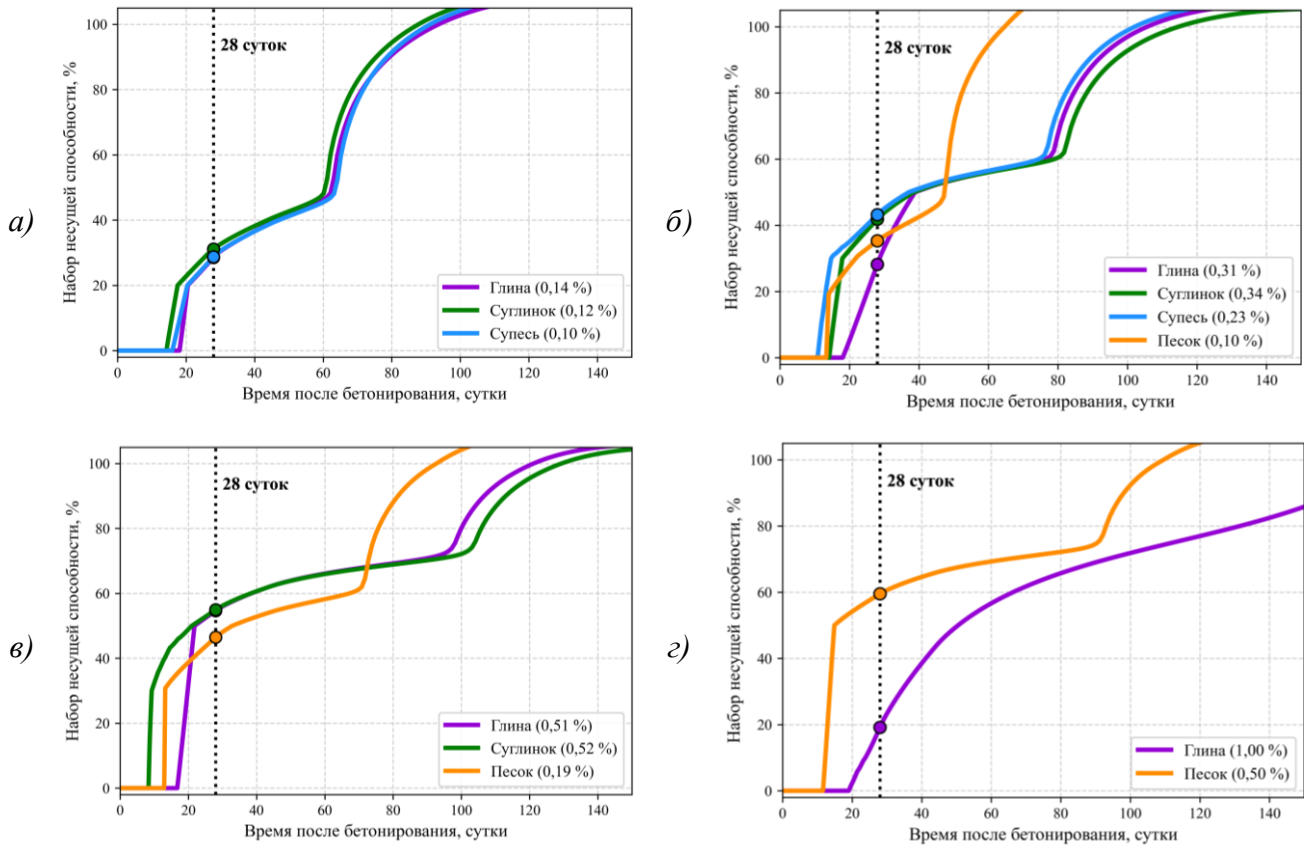


Рисунок 39 – Сравнение процесса набора несущей способности различных типов пород: а) незасоленные, б) слабозасоленные, в) средnezасоленные, г) сильнозасоленные (составлено автором)

Для незасоленных пород (Рисунок 39а) процесс стабилизации протекает относительно однородно. После завершения активной фазы льдообразования (первые 15–20 суток) связные породы синхронно начинают набирать несущую способность. При этом суглинки характеризуются незначительно более высокой интенсивностью набора несущей способности по сравнению с супесями и глинами.

С ростом степени засоленности (Рисунок 39б, в, г) наблюдается расслоение кривых. Траектории набора несущей способности для глин и суглинков на ранних и средних этапах близки, и их заметное разделение происходит лишь на поздних сроках (после 100 суток).

Важно отметить, что точные количественные значения на ранних этапах могут носить прогностический характер, так как основной массив эмпирических данных получен при температуре $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Глины (фиолетовые кривые) характеризуются наибольшей чувствительностью к температурным и физико-химическим факторам. В незасоленном состоянии они плавно восстанавливают несущую способность наравне с другими породами. Однако при сильном

засолении (1,00 %) совокупный эффект пониженной температуры начала замерзания и высокой теплоемкости глин приводит к замедлению набора несущей способности: кривая приобретает максимально пологий вид, и даже к 150-м суткам глина не успевает выйти на плато полного набора проектной несущей способности (U_{af} достигает лишь ~85 %).

Суглинки (зеленые кривые) демонстрируют поведение, близкое к глинам, но с незначительно более высокой интенсивностью на ранних этапах. В незасоленном состоянии суглинки (0,12 %) показывают самый быстрый старт набора несущей способности среди связных пород (кривая располагается чуть выше глин и супесей). При слабом и среднем засолении (0,34 % и 0,52 %) их траектории практически сливаются с глинами вплоть до 100-х суток, после чего суглинки чуть быстрее выходят на стационарный режим за счет меньшего содержания тонкодисперсных частиц.

Супеси (синие кривые) показывают переходный характер взаимодействия. Обладая меньшим содержанием льда-цемента по сравнению с суглинками и глинами, они быстрее преодолевают фазу интенсивного льдообразования. Это наглядно проявляется при среднем засолении (0,23 %), где супесь восстанавливает свою относительную прочность значительно быстрее глин и суглинков, кривая располагается заметно выше.

Пески (оранжевые кривые) характеризуются специфической нелинейной кинетикой. На начальных этапах остывания (в диапазоне температур, близких к T_{bf}) пески могут демонстрировать задержку в наборе несущей способности по сравнению со связными породами. Однако после начала активного фазового перехода происходит резкий скачок: пески, остывающие преимущественно кондуктивным путем из-за сниженного количества порового льда, набирают проектную несущую способность в разы быстрее. Так, сильнозасоленный песок (0,50 %) преодолевает основной фазовый переход и выходит на плато примерно к 100-м суткам, в то время как глина продолжает процесс стабилизации.

При интерпретации представленных графиков необходимо отметить, что параметр $U_{af}(t)$ отражает лишь степень завершенности процесса набора несущей способности для определенной породы. Однако, более быстрое остывание засоленного массива не приводит к росту его фактической прочности в абсолютных значениях. При выходе системы на проектную температуру незасоленные породы показывают большую несущую способность, чем засоленные из-за наличия в порах незамерзшего жидкого рассола.

Практический вывод из анализа кривых заключается в оценке состояния системы на нормативный срок окончания твердения бетона – 28 суток (вертикальная пунктирная линия на графиках).

Установлено, что в незасоленных условиях на 28-е сутки глинистый массив набирает не более 30% от проектной несущей способности. В условиях же сильного засоления этот показатель для глины составляет менее 20 %.

Для количественной оценки произведено сопоставление проектных значений, полученных по разработанной модели (F_{lat}), с регламентируемыми нормативными значениями (R_{af_sp}), рассчитанными дискретным табличным методом по СП 25.13330 [49] (Таблицы 16 и 17).

Таблица 16 – Сравнение несущей способности свайного основания на 14 и 28 сутки (по данным автора)

Порода	D_{sat} , %	Время, сутки					
		14			28		
		F_{lat} , кН	R_{af_sp} , кН	$\frac{F_{lat}}{R_{af_sp}}$	F_{lat} , кН	R_{af_sp} , кН	$\frac{F_{lat}}{R_{af_sp}}$
Глина	0,14	0	0	-	292	0	-
	0,31	0	0	-	259	0	-
	0,51	0	0	-	410	83	4,9
	1,00	0	0	-	80	36	2,2
Суглинок	0,12	0	0	-	284	0	-
	0,34	0	0	-	322	0	-
	0,52	254	0	-	333	66	5,0
Супесь	0,10	0	0	-	236	0	-
	0,23	198	0	-	336	0	-
Песок	0,10	177	0	-	341	0	-
	0,19	291	0	-	424	0	-
	0,50	271	0	-	438	22	19,9

Анализ полученных данных позволяет сделать ряд выводов, раскрывающих физические ограничения традиционного нормативного расчета применительно к нестационарным тепловым полям в засоленных породах криолитозоны:

– Как видно из таблицы 16, для большинства рассматриваемых дисперсных пород расчет по нормативным таблицам СП дает нулевую несущую способность ($R_{af_sp} = 0$) вплоть до 28-х суток. Это связано с дискретным характером нормативного подхода, при котором прочность появляется математически скачкообразно лишь при достижении массивом определенного строгого температурного порога. Разработанная авторская модель, обладая непрерывностью функции $R_{af}(t)$, физически корректно фиксирует начальные стадии формирования

ледоцементных связей. Она показывает, что остаточная несущая способность начинает формироваться раньше, чем массив остынет до проектных значений.

Таблица 17 – Сравнение несущей способности свайного основания на 56 и 84 сутки (по данным автора)

Порода	$D_{sat}, \%$	Время, сутки					
		56			84		
		$F_{lat}, \text{кН}$	$R_{af_sp}, \text{кН}$	$\frac{F_{lat}}{R_{af_sp}}$	$F_{lat}, \text{кН}$	$R_{af_sp}, \text{кН}$	$\frac{F_{lat}}{R_{af_sp}}$
Глина	0,14	452	0	-	963	846	1,1
	0,31	506	194	2,6	723	409	1,8
	0,51	490	135	3,6	523	157	3,3
	1,00	225	100	2,2	279	125	2,2
Суглинок	0,12	412	0	-	889	723	1,2
	0,34	425	143	3,0	542	241	2,2
	0,52	395	106	3,7	420	123	3,4
Супесь	0,10	359	0	-	782	469	1,7
	0,23	433	157	2,8	648	301	2,2
Песок	0,10	851	458	1,9	1105	629	1,8
	0,19	523	115	4,5	849	339	2,5
	0,50	504	42	12,0	535	52	10,3

– Несмотря на то, что непрерывная модель показывает наличие определенной несущей способности на 28-е сутки (например, 292 кН для незасоленной глины), эти абсолютные значения являются низкими для восприятия эксплуатационных нагрузок. Для сильнозасоленной глины (1,00 %) контактная зона на 28-е сутки мобилизует лишь 80 кН. Попытка передачи проектной нагрузки на сваю в этот период может привести к когезионному срыву по контакту и развитию деформаций ползучести.

– По мере остывания массива и завершения активной фазы льдообразования (Таблица 17) наблюдается закономерное сближение результатов. Для незасоленных и слабозасоленных глин и суглинков на 84-е сутки соотношение F_{lat}/R_{af_sp} снижается, асимптотически приближаясь к значениям 1,1–1,2. Сходимость является доказательством адекватности разработанной математической модели: на длительных временных интервалах авторский расчет коррелирует с СП 25.13330 [49], обеспечивая при этом непрерывный учет набора несущей способности.

Эффективное управление напряженно-деформированным состоянием системы в условиях доказанного снижения прочности смерзания требует принципиального изменения схемы передачи нагрузки. Поскольку во второй главе установлено, что засоление практически не снижает модуль деформации породного массива на сжатие, обоснованным решением является перераспределение несущей способности с боковой поверхности на лобовое сопротивление торца сваи. Полученные закономерности служат обоснованием необходимости перехода к конструктивным решениям, перераспределяющим нагрузку с боковой поверхности на лобовое сопротивление торца сваи.

3.4 Выводы по главе 3

1. Разработана и верифицирована данными натурных наблюдений комплексная численная модель термомеханического взаимодействия свайного основания с мерзлым массивом, учитывающая нелинейный характер выделения скрытой теплоты фазовых переходов влаги в засоленных породах и влияние экзотермической реакции гидратации бетона, а также влияние степени засоленности на температуру начала замерзания и прочность структурных связей.

2. Установлено, что внесение технологического тепла в массив приводит к формированию кольцевой зоны растепления радиусом от 0,38 до 0,47 м. Доказано, что площадь растепления увеличивается пропорционально росту засоленности для связных пород. Закономерность необходимо учитывать при проектировании модульных свайных оснований во избежание критического сокращения несущих мерзлых перемычек между сваями.

3. На базе результатов численного моделирования предложена аналитическая степенная функция и разработана номограмма для прогноза времени температурно-прочностной стабилизации контактной зоны. Доказано, что время набора полной прочности смерзания нелинейно возрастает со степенью засоленности пород.

4. Разработан алгоритм оценки несущей способности свайных оснований на ранних этапах твердения бетона для пород различной степени засоленности.

5. Выявленные закономерности термомеханического взаимодействия подтверждают, что в условиях засоленных мерзлых пород наблюдается критическое снижение несущей способности по боковой поверхности свайного основания, это является обоснованием необходимости перехода к конструктивным решениям, перераспределяющим нагрузку на лобовое сопротивление торца сваи.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙНЫХ ОСНОВАНИЙ

Результаты комплексного термомеханического моделирования, изложенные в третьей главе диссертационного исследования, убедительно доказали, что в условиях засоленных ММП традиционные подходы к проектированию свайных оснований обладают существенными ограничениями. Совокупный эффект теплового воздействия при устройстве свай и физико-химического влияния поровых растворов солей приводит к значительному снижению несущей способности по боковой поверхности свайного основания.

Для обеспечения несущей способности и устойчивости технологических платформ в подобных инженерно-геокриологических условиях увеличение длины или диаметра свай является экономически и технологически нецелесообразным, а зачастую невозможным. Таким образом, возникает необходимость в разработке новых конструктивно-технологических решений, способных трансформировать механизм взаимодействия свайного основания с породным массивом.

Поэтому необходимым является разработка и геомеханическое обоснование методики возведения модульных свайных оснований, базирующихся на применении конструкции с пробкой-пятой. Предложен алгоритм управления НДС массива, проведено численное моделирование в программном комплексе PLAXIS 3D для оценки локализации пластических деформаций, а также количественно оценена эффективность разработанных рекомендаций по повышению несущей способности свайных оснований в условиях криолитозоны.

4.1 Разработка методики обоснования рациональных технологических параметров свайных оснований и оценки несущей способности

Основой для разработки методики повышения устойчивости технологических платформ послужили закономерности деформирования мерзлых пород, полученные на базе экспериментальных исследований. Анализ деформационно-прочностных характеристик (Таблица 18) выявил характерные зависимости для засоленных ММП: повышение концентрации солей (вплоть до $D_{sal} = 1,00\%$) приводит к нелинейному снижению прочности ледоцементных связей, вызывая падение эквивалентного сцепления и предельно длительного сопротивления срезу. Однако при этом минеральный скелет породы сохраняет свою структурную жесткость при сжатии, в результате чего модуль деформации массива под торцом сваи не подвергается снижению, а в ряде случаев локально возрастает (например, для мерзлых суглинков с 10,74 до 12,86 МПа).

Таблица 18 – Деформационно-прочностные характеристики мерзлых пород (по данным автора)

Тип пород	Степень засоленности D_{sal} , %	Модуль деформации E , МПа	Эквивалентное сцепление c , МПа	Предельно длительное значение сопротивления срезу R_{af} , МПа
Глина	Незасоленная (0,14)	9,47	0,285	0,348
	Слабозасоленная (0,31)	9,72	0,153	0,302
	Среднезасоленная (0,51)	10,00	0,097	0,252
	Сильнозасоленная (1,00)	10,18	0,041	0,102
Суглинок	Незасоленный (0,12)	10,74	0,273	0,397
	Слабозасоленный (0,34)	12,10	0,108	0,335
	Среднезасоленный (0,52)	12,86	0,074	0,286
Супесь	Незасоленная (0,10)	11,78	0,265	0,420
	Слабозасоленная (0,23)	10,42	0,183	0,362

Следовательно, эффективное управление НДС основания в условиях сниженного бокового сцепления должно базироваться на перераспределении внешней вертикальной нагрузки с ослабленной поверхности смерзания на лобовое сопротивление пород под пятой сваи. Для реализации механизма в рамках диссертационного исследования предложена и обоснована технология устройства сваи с пробкой-пятой [41].

Разработанное конструктивно-технологическое решение базируется на усовершенствовании технологии ударно-вращательного бурения с одновременной обсадкой (системы типа Symmetrix). Технологическая последовательность включает следующие этапы:

1. Бурение скважины с одновременным погружением обсадной трубы-оболочки, что минимизирует разупрочнение ММП и исключает попадание обводненных пород сезонно-талого слоя в забой;

2. Извлечение бурового инструмента с оставлением обсадной трубы на проектной отметке;

3. Установка во внутреннюю полость трубы специальной запираемой пробки-пяты, надежно фиксируемой посредством байонетного соединения;

4. Исключение этапа сплошного бетонирования ствола (отсутствие экзотермии гидратации), что обеспечивает ускоренную температурно-прочностную стабилизацию контакта и возможность раннего приложения эксплуатационных нагрузок. Важным экологическим

преимуществом полрой конструкции является принципиальная возможность полного демонтажа сваи после завершения эксплуатации технологической платформы.

Применение модульных свай с пробкой-пятой принципиально меняет механизм работы свайного основания. В традиционных сваях предельное состояние чаще всего наступает при срыве по боковой поверхности. В предлагаемой конструкции при малых нагрузках НДС системы обеспечивается остаточным сдвиговым сцеплением по боковой поверхности. По мере исчерпания несущей способности контакта, свая не претерпевает срыва, так как происходит активация лобового сопротивления пород под торцом сваи, и нагрузка перераспределяется на пробку-пятю. Система трансформируется в комбинированную «сваю-стойку».

Для практической реализации описанного эффекта при проектировании технологических платформ разработана методика оценки несущей способности. За основу принята методика определения несущей способности сваи (1) согласно СП 25.13330 [49]. Ввиду изменения механизма работы, базовое уравнение модифицировано путем введения коэффициента конструктивного упрочнения (k_{str}), количественно описывающего перераспределение напряжений в область под нижним торцом сваи.

Модифицированное условие обеспечения несущей способности $F_{u,mod}$ сваи с пробкой-пятой в засоленных ММП принимает вид (20):

$$F_{u,mod} = \gamma_t \gamma_c \left(\sum_{i=1}^n R_{af,i}(D_{sal}) \cdot A_{af,i} + k_{str} \cdot R \cdot A \right) \quad (20)$$

При этом должно выполняться условие (21):

$$F \leq \frac{F_{u,mod}}{\gamma_n} \quad (21)$$

где F – расчетная вертикальная нагрузка на свайное основание, кН;

γ_n – коэффициент надежности по назначению сооружения;

γ_t – температурный коэффициент;

γ_c – коэффициент условий работы основания;

$R_{af,i}(D_{sal})$ – расчетное сопротивление мерзлой породы сдвигу по боковой поверхности смерзания, является нелинейной функцией от степени засоленности D_{sal} , определяемой по формулам (5) и (15);

$A_{af,i}$ – площадь поверхности смерзания с боковой поверхностью сваи, м²;

R – расчетное сопротивление мерзлого породы под нижним концом сваи, кПа;

A – площадь опирания сваи (площадь пробки-пяты), м²;

k_{str} – коэффициент конструктивного упрочнения ($k_{str} = F_u^{mod} / F_u^{std}$).

Для свай без пробки-пяты $k_{str} = 1$, для свай с пробкой-пятой определяется по разработанным номограммам.

В рамках предложенной методики обоснование рациональных параметров свайного основания сводится к следующему алгоритму: по данным инженерно-геологических изысканий определяется степень засоленности D_{sal} . Далее определяется остаточный уровень бокового сопротивления R_{af} . При выявлении недостаточной несущей способности производится подбор диаметра пробки-пяты и соответствующего коэффициента k_{str} , достаточных для достижения требуемой несущей способности.

В сравнении с типовыми решениями, разработанная методика позволяет компенсировать потерю несущей способности за счет изменения механизма деформирования основания, что гарантирует высокую устойчивость и несущую способность технологических платформ. Для верификации предложенного аналитического аппарата и определения точных значений коэффициента k_{str} выполнено численное пространственное моделирование системы «свайное основание – мерзлый массив».

4.2 Разработка рекомендаций по повышению устойчивости и несущей способности свайных оснований в условиях криолитозоны и прибрежного шельфа

Для количественной оценки несущей способности, анализа НДС массива вблизи сваи и верификации предложенной методики, было выполнено пространственное численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ). Исследование проводилось в геотехническом программном комплексе PLAXIS 3D.

4.2.1 Разработка расчетной модели и задание граничных условий

Пространственная модель представляет собой репрезентативный объем породного массива размерами 20x20x20 м, в центре которого располагается одиночная свая (Рисунок 40). Геометрия модели включает сваю диаметром 325 мм и длиной 10 м. Диаметр выбран как соответствующий стандартным размерам обсадных труб, совместимых с буровыми системами типа Symmetrix. Свая установлена в двухслойное основание, состоящее из сезонно-талого слоя (СТС) мощностью 2 м и подстилающего слоя ММП.

Для дискретизации модели использовалась конечно-элементная сетка, состоящая из 10-узловых тетраэдрических элементов. С целью повышения точности результатов в зоне, прилегающей к свае, где ожидаются наибольшие градиенты напряжений и деформаций, сетка была значительно измельчена, с постепенным укрупнением элементов по мере удаления к границам модели.

Взаимодействие на границе «свая-массив» моделировалось с помощью специальных 16-узловых интерфейсных элементов. Прочностные свойства интерфейса (сцепление и трение) были заданы в соответствии с экспериментально полученным предельно длительным значениям

сопротивления срезу (R_{af}) при соответствующих значениях засоленности D_{sal} , в соответствии с таблицей 18.

Сходимость численного решения на каждом шаге нагружения контролировалась по стандартному критерию, основанному на норме неуравновешенных сил. Расчет считался сошедшимся, когда эта норма становилась меньше 0,01, что обеспечивает высокую точность и достоверность получаемых результатов.

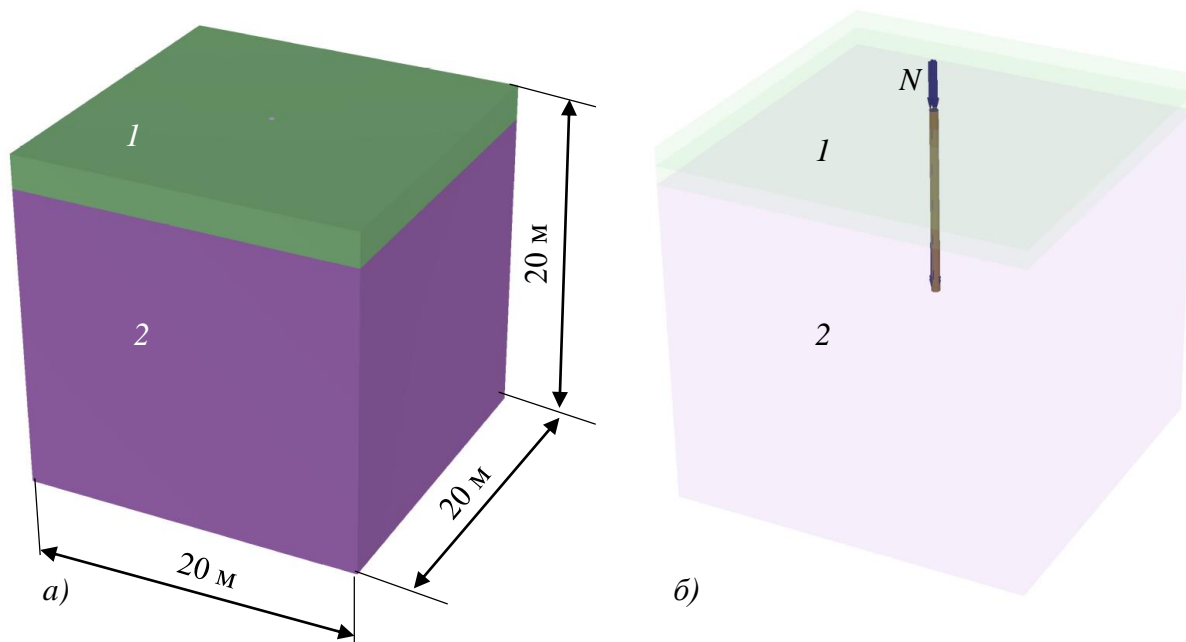


Рисунок 40 – Пространство модели (1 – сезонно-талый слой; 2 – слой многолетнемерзлых пород; N – вертикальная нагрузка): а) геометрия модели; б) расположение сваи в породном массиве (составлено автором)

Задача сводилась к анализу НДС трехмерного породного массива, содержащего одиночную несущую сваю, под действием статической вертикальной нагрузки. Влияние термических процессов учтено через исходные физико-механические свойства мерзлых пород, представленные ранее в таблице 18. В качестве объектов моделирования были выбраны три основных типа связных пород: глины, суглинки и супеси. Исключение из численного эксперимента мерзлых песков обосновано двумя факторами: отсутствием в экспериментальной базе данных для незасоленного состояния, а также отличием механизма их деформирования, при котором прочность определяется скелетным минеральным трением, а не разрушением ледоцементных связей, наиболее уязвимых к засолению.

Для обеспечения высокой степени достоверности расчетов, входные параметры для численной модели были основаны на собственных экспериментальных исследованиях, проведенных на образцах мерзлых пород с полуострова Ямал. Для обеспечения корректного механического поведения модели заданы граничные и начальные условия для типовой

аналитической модели взаимодействия одиночной сваи с породным основанием, образованным ММП. Для моделирования механического поведения мерзлых пород в расчете принята упругопластическая модель Мора-Кулона.

Расчетная температура ММП была принята равной -3°C . Для моделирования были выбраны средние значения, характерные для засоленных и незасоленных пород, представленных глинами, суглинками и супесями, из диапазона экспериментально полученных данных. Для моделирования применялись следующие характеристики талых пород и материала сваи (Таблица 19).

Таблица 19 – Исходные характеристики породного массива и материала сваи [97, 155]

Параметр	Грунт сезонно-талого слоя	Материал сваи
Модель материала	Hardening Soil	Linear Elastic
Модуль деформации/упругости, кПа	3000	200000000
Коэффициент Пуассона	0,2	0,25
Сцепление, кПа	34	-
Угол внутреннего трения, °	23	-
Объемный вес, кН/м ³	18	77,3
Коэффициент пористости, д. ед.	0,5	-

Несмотря на то, что модель Мора-Кулона не описывает явным образом процессы ползучести, характерные для мерзлых пород [51, 134, 142], этот эффект учитывается косвенно. Подход заключается в замене сложного термо-вязкопластического анализа во времени на квазистатический расчет с использованием предельно длительных характеристик прочности и деформируемости, соответствующих стабилизированной стадии деформирования пород, что является общепринятой практикой для оценки долговременной устойчивости. Используемые входные параметры основаны на результатах серии длительных лабораторных испытаний образцов мерзлых пород, отобранных на полуострове Ямал. Такой метод дает консервативную оценку несущей способности, то есть определяет ее минимальное значение на конец срока службы объекта, что полностью отвечает целям безопасного проектирования.

Расчет выполнялся последовательно в несколько этапов: формирование начального напряженного состояния в породном массиве, создание скважины с обсадкой, установка пробки-пяты, смерзание конструкции с окружающими ММП и последующее приложение ступенчато возрастающей вертикальной нагрузки на оголовки сваи. Процедура нагружения была разработана для построения полной кривой «нагрузка-осадка» и определения предельной несущей способности. Сначала прикладывалась начальная нагрузка, соответствующая напряжению в 1 МПа, для моделирования начальных эксплуатационных условий и стабилизации решения. Затем задавалась ступенчато возрастающая нагрузка, причем в качестве целевого значения в настройках решателя было указано напряжение, превышающее 100 МПа. Оно было

задано для того, чтобы гарантированно довести модель до состояния отказа. Фактическая предельная несущая способность сваи определялась как максимальная нагрузка, достигнутая на последнем шаге расчета перед потерей численной сходимости.

4.2.2 Анализ кривых деформирования и несущей способности

Численное моделирование в геотехническом комплексе было проведено для систематического анализа и сравнения несущей способности предложенной сваи с пробкой-пятой (ССПП) и сваи-прототипа без пробки-пяты (СБПП) в различных инженерно-геологических условиях, характерных для полуострова Ямал [154]. Основным результатом моделирования являются кривые зависимости «нагрузка – осадка» (Рисунки 41 и 42).

Анализ зависимостей позволяет сделать следующие ключевых наблюдения:

1. Во всех рассмотренных случаях кривые для сваи с пробкой-пятой располагаются значительно выше кривых для сваи без пробки-пяты, что свидетельствует о более высокой несущей способности и жесткости предложенной конструкции.

2. Несущая способность обоих типов свай в незасоленных породах (Рисунок 41) существенно превышает показатели в засоленных породах (Рисунок 42).

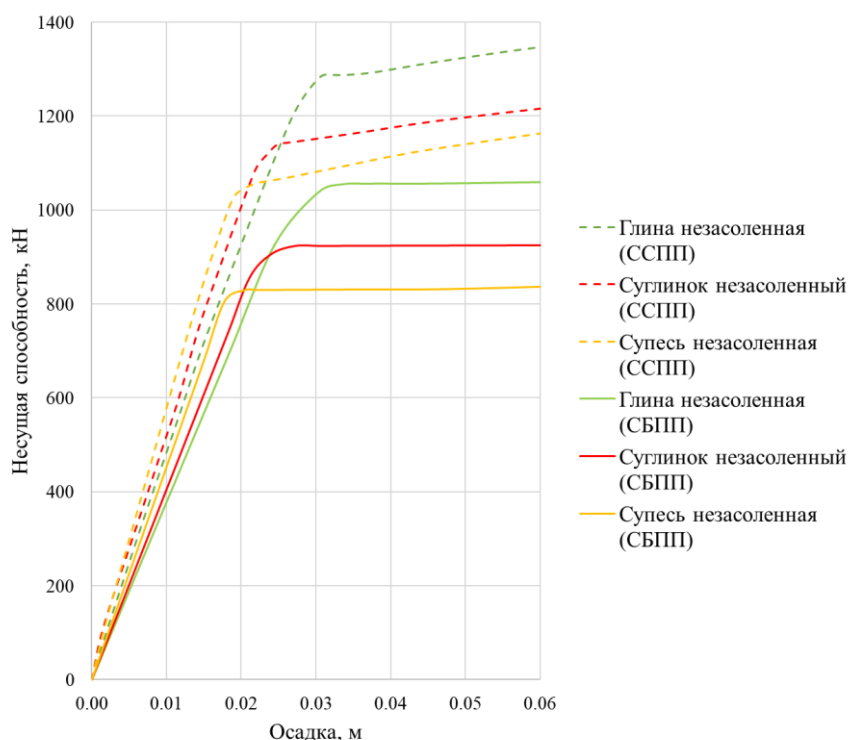


Рисунок 41 – Зависимость осадки от вертикальной нагрузки для незасоленных пород (составлено автором)

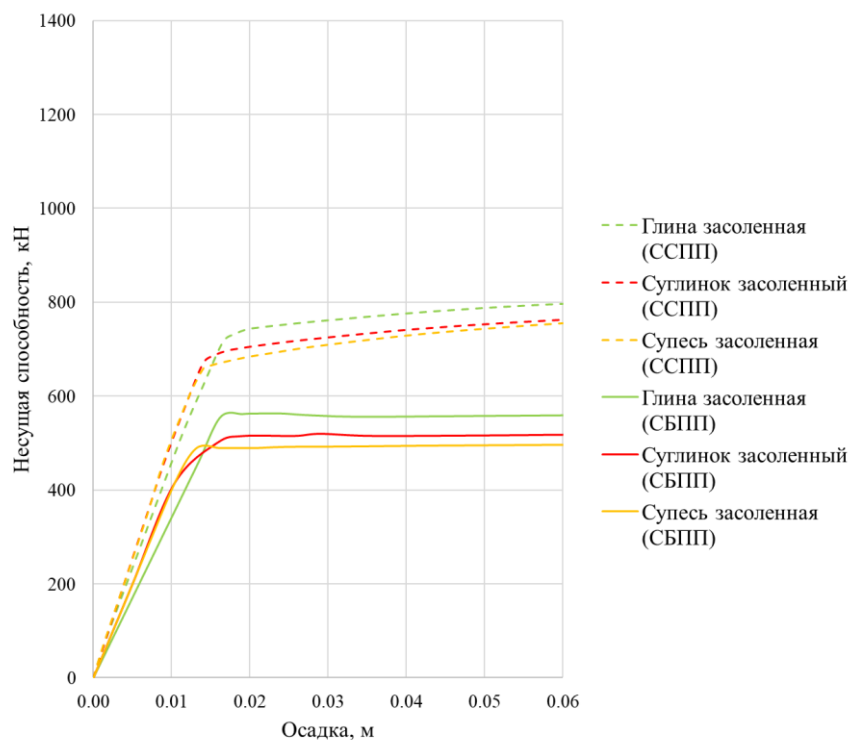


Рисунок 42 – Зависимость осадки от вертикальной нагрузки для засоленных пород (составлено автором)

Для точной количественной оценки эффективности предложенного решения предельные несущие способности, определенные по графикам, были сведены в таблицу 20.

Таблица 20 – Сводные результаты численного моделирования предельной несущей способности (по данным автора)

Тип сваи	Порода	Тип породы	Несущая способность, кН	Прирост несущей способности с пробкой-пятой, %
Свая с пробкой пятой	Глина	Незасоленный	1420	+35,2
	Суглинок		1300	+41,3
	Супесь		1250	+51,5
	Глина	Засоленный	830	+48,2
	Суглинок		820	+60,8
	Супесь		800	+63,3
Свая без пробки пяты	Глина	Незасоленный	1050	-
	Суглинок		920	
	Супесь		825	
	Глина	Засоленный	560	
	Суглинок		510	
	Супесь		490	

Выявлено, что установка пробки-пяты обеспечивает значительное увеличение несущей способности сваи, варьирующееся в диапазоне от 35,2% до 63,3%. Важно отметить, что

наибольший относительный прирост несущей способности (+48,2%...+63,3%) наблюдается в наиболее слабых, засоленных породах, что подчеркивает особую ценность технологии для сложных геокриологических условий.

Результаты также позволяют выявить закономерности влияния свойств пород на несущую способность для обоих типов свай. Для всех случаев наблюдается последовательное снижение несущей способности в ряду Глина → Суглинок → Супесь. Кроме того, наличие солей в породах является критическим фактором, снижающим несущую способность в среднем на 40-50% по сравнению с незасоленными аналогами.

Анализируя форму полученных кривых «нагрузка-осадка», следует отдельно объяснить наблюдаемую фазу упрочнения для ССПП. Этот эффект является не свойством упругопластической модели материала, а отражает структурный отклик системы «свая-массив». Его можно представить последовательной мобилизацией механизмов сопротивления: на начальных этапах нагружения преимущественно мобилизуются силы срезания по боковой поверхности сваи. При дальнейшем росте нагрузки свая без пробки-пяты переходит в стадию пластического течения (пологое плато на графике), что означает исчерпание несущей способности по боковой поверхности. Напротив, для сваи с пробкой-пятой при дальнейшем увеличении нагрузки происходит постепенное включение в работу пробки-пяты, что активизирует несущую способность пород под нижним торцом сваи. Именно это поэтапное вовлечение различных компонентов сопротивления, требующее нарастающего смещения для полной мобилизации, и проявляется на графике как фаза пологого роста нагрузки.

4.2.3 Оценка перераспределения напряжений и локализации деформаций

Особое значение механизм имеет для засоленных пород (Рисунок 42). Сравнение предельных нагрузок показывает, что засоление критически (до 50%) снижает несущую способность традиционной сваи. Применение пробки-пяты позволяет компенсировать эти потери. Для количественного подтверждения трансформации механизма работы сваи был выполнен анализ распределения нагрузки при достижении предельного состояния. Путем интегрирования касательных напряжений по боковой поверхности сваи и нормальных напряжений по ее нижнему торцу были определены их вклады в общую несущую способность. Результаты расчетов сведены в таблицу 21.

Таблица 21 – Распределение нагрузки при достижении предельной несущей способности (по данным автора)

Порода	Общая несущая способность, кН	Сопrotивление по боковой поверхности, кН	Сопrotивление 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

Анализ данных показывает, что пята воспринимает и передает на основание от 41,3% до 45,4% от общей приложенной нагрузки. Важно отметить, что механизм распределения нагрузки демонстрирует высокую стабильность. Это может свидетельствовать о надежности предложенной конструкции в различных геокриологических условиях. Кроме того, это доказывает физическую обоснованность способа устройства свай с пробкой-пятой: в условиях засоления, несмотря на сниженное сцепление по боковой поверхности, высокий модуль деформации массива позволяет пяте забирать на себя от 41,3% до 45,4% от общей приложенной нагрузки.

Для наглядного подтверждения количественных данных из таблицы 21 и визуализации принципиальных различий в механизме работы свай на рисунке 43 показано распределение точек пластического течения в породном массиве в момент достижения предельной нагрузки.

В модели свай без пробки-пяты (Рисунок 43, а) пластические точки в области нижнего торца практически отсутствуют. Это означает, что ММП под сваей остаются в упругой стадии и не несут значительной нагрузки, а разрушение происходит за счет исчерпания несущей способности по боковой поверхности. Напротив, в модели со свай с пробкой-пятой (Рисунок 43, б) наблюдается формирование четко очерченной зоны пластического течения непосредственно под пятой. Эта «луковица» пластичности подтверждает передачу значительной доли нагрузки через пяту на основание.

Таким образом, результаты численного моделирования полностью подтверждают достоверность предложенной в п. 4.1 методики расчета и доказывают, что трансформация свай в комбинированную «сваю-стойку» является наиболее эффективным методом управления напряженно-деформированным состоянием породного массива в условиях криолитозоны.

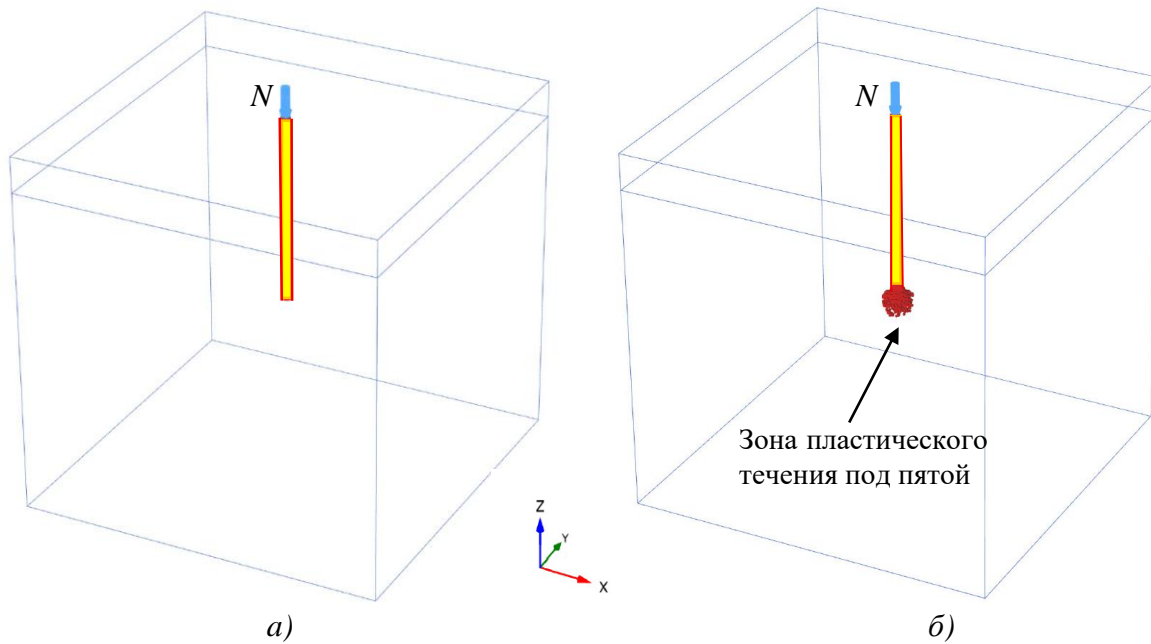


Рисунок 43 – Распределение зон пластического течения (красный цвет) в системе «свая-породный массив» при достижении предельной вертикальной нагрузки N : *а* – свая без пробки-пяты (прогрессирующий срыв по поверхности смерзания); *б* – свая с пробкой-пятой (локализация пластических деформаций под пятой сваи) (составлено автором)

4.3 Эффективность практического применения разработанных рекомендаций

Для интеграции результатов численного моделирования в разработанную инженерную методику, был произведен расчет коэффициентов конструктивного упрочнения для всего спектра засоленности пород, исследованного в диссертации.

4.3.1 Анализ эффективности предложенного решения

Результаты численного моделирования были получены для незасоленных и пород с максимальной засоленностью, зафиксированной в ходе лабораторных испытаний.

Определение промежуточных значений предельной несущей способности для остальных концентраций солей выполнялось методом аналитической интерполяции на основе экспериментально выявленной зависимости (5), поскольку модуль деформации массива под торцом сваи практически не зависит от засоленности, лобовое сопротивление породы под пятой сваи принято постоянным, в свою очередь шаг падения общей несущей способности принят пропорциональным шагу снижения предельно длительного сопротивления срезу из таблицы 18. Полученные значения предельной нагрузки для сваи с пробкой-пятой F_u^{mod} , сваи без пробки-пяты F_u^{std} и коэффициента конструктивного упрочнения k_{str} от степени засоленности D_{sal} представлена на рисунке 44 и в таблице 22.

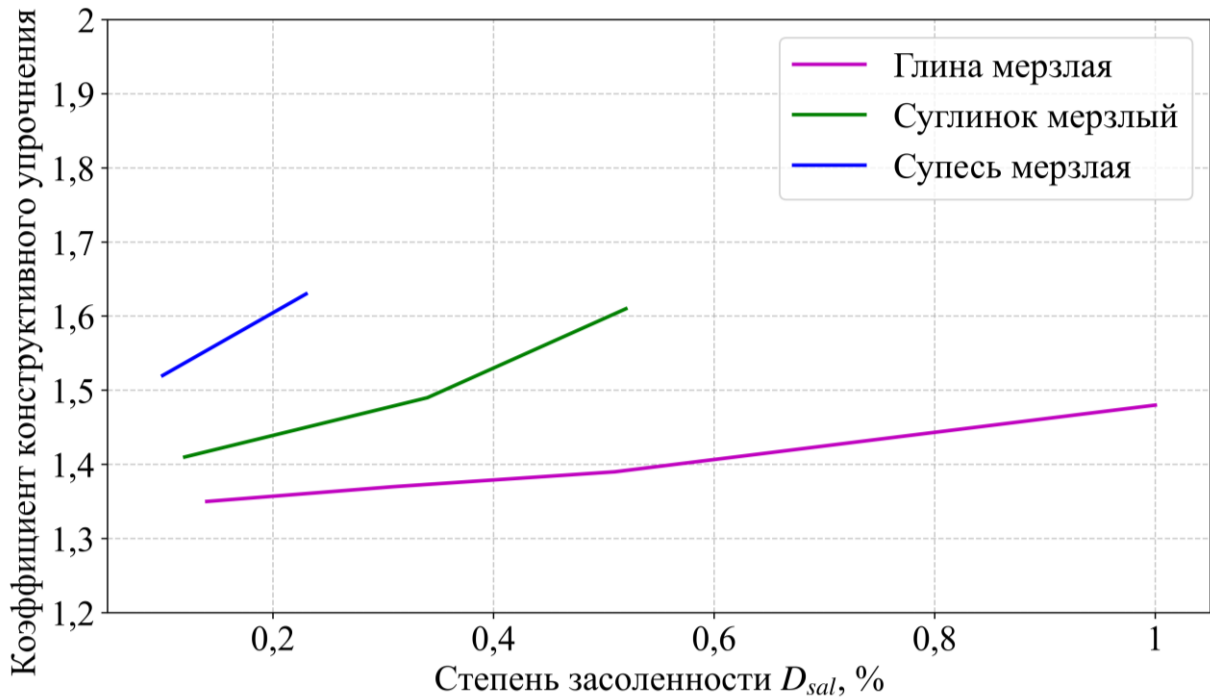


Рисунок 44 – Зависимость коэффициента конструктивного упрочнения (k_{str}) от степени засоленности многолетнемерзлых пород (составлено автором)

Таблица 22 – Расчетные коэффициенты (по данным автора)

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

Анализ полученных данных показывает, что эффективность применения свай с пробкой-пятой экспоненциально возрастает пропорционально росту концентрации порового раствора солей (D_{sal}). Так, для незасоленных глин ($D_{sal} = 0,14\%$) конструкция повышает несущую способность на 35% ($k_{str} = 1,35$). При переходе породы в категорию сильнозасоленных ($D_{sal} = 1,00\%$) предельная нагрузка, воспринимаемая боковой поверхностью, резко падает из-за разрушения ледоцемента. В этот момент лобовой отпор пяты активизируется, за счет чего доля ее участия в общей работе основания возрастает, а коэффициент конструктивного упрочнения увеличивается до 1,48.

Наиболее ярко эффект трансформации механизма деформирования выражен для мерзлых супесей, где при слабозасоленном состоянии ($D_{sal} = 0,23\%$) коэффициент достигает пикового значения $k_{str} = 1,63$, что обеспечивает повышение несущей способности основания в 1,6 раза.

4.3.2 Методика расчета рациональных параметров свайных оснований

Полученные коэффициенты k_{str} и значения лобового сопротивления служат входными параметрами для предложенного условия устойчивости. Внедрение предложенной конструкции технологических платформ в практику проектирования предлагается осуществлять по следующему алгоритму:

1. На основе инженерно-геологических изысканий определяются тип мерзлой породы, температура начала замерзания и степень засоленности D_{sal} ;
2. По полученной нелинейной модели (5) вычисляется значение сопротивления срезу R_{af} для выявленного значения D_{sal} ;
3. Рассчитывается несущая способность сваи без пробки-пяты по нормативной методике СП 25.13330 [49]. В случае выявления недостатка несущей способности в качестве возможного решения применяется предложенная конструкция сваи с пробкой-пятой;
4. По номограмме (Рисунок 44 – Зависимость коэффициента конструктивного упрочнения (k_{str}) от степени засоленности многолетнемерзлых пород) для заданного типа породы и уровня засоленности определяется коэффициент конструктивного упрочнения k_{str} ;
5. Используя модифицированное уравнение (20) производится подбор диаметра пробки-пяты, достаточного для компенсации потерянного контактного трения за счет активации лобового сопротивления;
6. При проектировании технологических платформ с повышенной требуемой несущей способностью учитывается, что полая конструкция сваи-оболочки позволяет в процессе эксплуатации размещать внутри искусственные хладагенты (например, твердый диоксид углерода) для формирования армированного ледопородного цилиндра вокруг сваи, что дополнительно повысит пространственную жесткость основания.

Разработанная методика позволяет достоверно прогнозировать несущую способность и управлять процессом перераспределения напряжений в массиве, обеспечивая необходимую несущую способность свайных оснований технологических платформ в сложных арктических условиях при снижении уровня материалоемкости строительства.

4.4 Технико-экономическая эффективность практического применения разработанных рекомендаций

Основные сложности освоения углеводородных месторождений полуострова Ямал обусловлены суровым арктическим климатом, коротким навигационным периодом, наличием

многолетнемерзлых пород, малыми глубинами моря и присутствием донных породных массивов со слабой несущей способностью [94]. Присутствие засоленных породных массивов, характеризующихся высокой чувствительностью к тепловому воздействию, накладывает строгие ограничения на выбор типов сооружений.

При классификации сооружений внимание уделяется конструкционному материалу (насыпные, ледовые, металлические, железобетонные, комбинированные), конструктивным особенностям (острова, эстакады, стационарные и погружные платформы) и методам крепления ко дну (свайные, гравитационные, комбинированные).

Для повышения несущей способности [121] и снижения затрат в условиях мелководья Ямала в настоящее время предложена концепция создания модульных свайных оснований (МСО) [39, 40], объединенных в единую технологическую платформу (Рисунок 45).

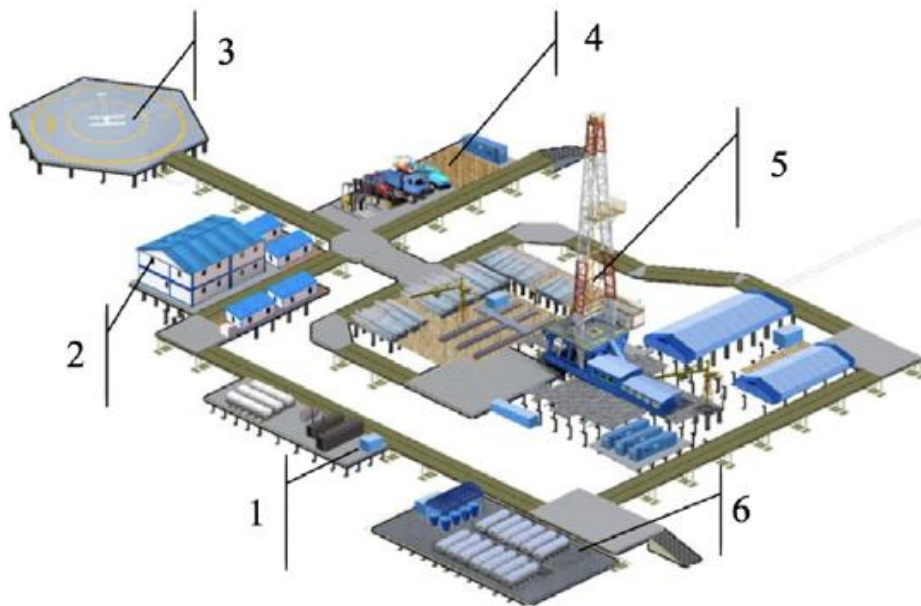


Рисунок 45 – Концептуальная схема технологической платформы на базе модульных свайных оснований: 1 – территория котельной установки; 2 – жилой модуль; 3 – вертолетная площадка; 4 – зона стоянки и обслуживания техники; 5 – зона безопасности буровой установки; 6 – площадка с противопожарными резервуарами [121]

Для обоснования технико-экономической целесообразности применения МСО был проведен сравнительный анализ альтернативных технологий возведения площадных объектов.

Широко известен мировой опыт строительства искусственных островов. Их использование началось около полувека назад в мелководном районе моря Бофорта [77]. Строительным материалом для их возведения служат песок и гравий. Стоимость возведения такого острова зависит от объема материала и дальности его транспортировки [139]. Анализ искусственных насыпных островов показывает, что к их основным достоинствам относятся

возможность использования в различных климатических условиях, высокая технологичность возведения и простота последующего обслуживания. Однако технология имеет ряд критических недостатков: прямая зависимость от местных геолого-литологических условий, колоссальная материалоемкость, высокая экологическая нагрузка на этапе демонтажа и значительные финансовые затраты при ликвидации объекта.

Альтернативой являются искусственные ледовые острова [80], впервые испытанные в 1974 г. Они экономически выгоднее и наносят меньший ущерб экосистеме [87]. Тем не менее, их применение существенно ограничено сезонностью возведения. Кроме того, технология требует высоких затрат на поддержание круглогодичной эксплуатации и характеризуется отсутствием полноценной нормативной базы для проектирования.

В связи с этим, применение МСО является наиболее сбалансированным решением. Технология позволяет вести строительство в условиях слабых пород, отличается простотой монтажа и демонтажа, а также минимальным экологическим ущербом. К традиционным недостаткам МСО принято относить необходимость непрерывного геотехнического мониторинга состояния многолетнемерзлых пород. Установлено [37], что стоимость возведения МСО в среднем на 50% ниже стоимости строительства и поддержания насыпных островов. Ориентировочное сравнение капитальных затрат представлено в таблице 23.

Как видно из проведенного анализа, базовые МСО экономически значительно выгоднее насыпных сооружений. Однако, в условиях засоления несущей способности по боковой поверхности свай может быть недостаточно. В рамках традиционных инженерных решений компенсация этой потери потребовала бы кратного увеличения длины или диаметра свай, что привело бы к перерасходу металла, увеличению сроков бурения и, как следствие, удорожанию МСО.

Предложенный способ сооружения свай с пробкой-пятой позволяет комплексно решить эту проблему: исключает термическое воздействие на массив мерзлых пород, оптимизирует материалоемкость, исключая необходимость увеличения габаритов свай, обеспечивает прирост несущей способности свайного основания.

Таким образом, технико-экономическая эффективность внедрения предложенной методики заключается в обеспечении возможности безопасного применения экономически выгодных МСО на засоленных территориях полуострова Ямал. Способ позволяет добиться повышения несущей способности при снижении капитальных затрат на 40-50% по сравнению с традиционными насыпными сооружениями.

Таблица 23 – Сравнительная технико-экономическая характеристика технологий возведения инфраструктурных объектов (по данным автора)

Технология	Ориентировочные капитальные затраты на строительство, млрд руб.	Ограничения при работе в засоленных мерзлых породах
Искусственные насыпные острова	2,7 – 3,6	Отсутствие подходящих местных песков, высокие затраты на логистику, риск деградации подстилающей мерзлоты
Искусственные ледовые острова	1,35 – 1,8	Ограниченный срок службы, высокие затраты на поддержание температурного режима
Модульные свайные основания (базовая технология)	0,9 – 1,0	Возможный недостаток несущей способности свай из-за разрушения ледоцемента
Модульные свайные основания (предложенный способ с пробкой-пятой)	1,0 – 1,1*	Риски устранены за счет изменения схемы работы основания и включения в работу лобового сопротивления пород

*Примечание: увеличение верхней границы стоимости учитывает затраты на проведение опытно-промышленных испытаний и первичную апробацию запатентованной конструкции в натуральных условиях. При переходе к серийному применению технологии ожидается выравнивание капитальных затрат с базовыми решениями.

4.5 Выводы по главе 4

1. Разработано и обосновано конструктивно-технологическое решение по устройству свайных оснований с пробкой-пятой [41], предназначенное для сложных инженерно-геокриологических условий криолитозоны. Установлено, что применение предложенного решения принципиально меняет механизм деформирования основания: при исчерпании несущей способности по боковой поверхности происходит трансформация сваи в комбинированную «сваю-стойку», что обеспечивает надежное восприятие нагрузки.

2. На основе пространственного численного моделирования в программном комплексе доказано, что предложенный способ позволяет эффективно управлять напряженно-деформированным состоянием породного массива. Перераспределение до 45% вертикальной нагрузки на лобовое сопротивление пород под торцом сваи предотвращает срыв по боковой поверхности и обеспечивает пространственную локализацию зон пластических деформаций под пятой сваи.

3. Выявлена следующая закономерность: эффективность применения модульных свай с пробкой-пятой экспоненциально возрастает пропорционально росту концентрации порового раствора солей. За счет сохранения высоких значений модуля деформации массива под пятой, коэффициент конструктивного упрочнения достигает значений 1,48 для сильнозасоленных глин

и 1,63 для мерзлых супесей, что обеспечивает повышение общей несущей способности основания в 1,6 раза по сравнению с традиционными решениями.

4. Разработана методика и предложено модифицированное условие обеспечения устойчивости свайных оснований, включающее полученные коэффициенты конструктивного упрочнения. Предложенная методика позволяет компенсировать снижение несущей способности от засоления за счет управления механизмом работы свайного основания. Дополнительным технологическим преимуществом решения является полая структура сваи-оболочки, обеспечивающая возможность ее полного демонтажа и снижающая техногенную нагрузку на уязвимые арктические экосистемы.

5. Обоснована технико-экономическая эффективность предложенного конструктивного решения при обустройстве месторождений углеводородов в условиях арктического побережья и мелководного шельфа (на примере п-ова Ямал). Доказано, что применение модульных свайных оснований с пробкой-пятой позволяет снизить капитальные затраты на 40–50% по сравнению с традиционными насыпными островами за счет сокращения материалоемкости и логистических издержек. Установлено, что в отличие от базовых свайных технологий, предложенный способ снижает риски потери несущей способности в засоленных мерзлых породах, обеспечивая при этом соблюдение экологических стандартов.

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 натуральных 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 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 связных 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов, В. И. Засоленные мерзлые грунты Арктического побережья как основание сооружений / Москва : Все о мире строительства, 2008. – 351 с. – ISBN 978-5-9901535-1-6. – EDN QNNVРВ.
2. Аксенов, В. И. Рекомендации по определению прочности мерзлых грунтов с морским типом засоления / В. И. Аксенов, Г. И. Дубиков, Н. В. Иванова // – М.: ФГУП ПНИИИС Госстроя России. – 2001.
3. Андрианов, П. И. Температура замерзания грунтов // – М.: Изд-во АН СССР. – 1936.
4. Богданов, Н. С. Вечная мерзлота и сооружения на ней // – Изд. Особой высшей комиссии для всестороннего исследования Ж.-д. дела в России. – 1912. – №. 83.
5. Болдырев, Г. Г. Влияние циклического замораживания-оттаивания на прочность и деформируемость мерзлых грунтов: состояние вопроса / Г. Г. Болдырев, И. Х. Идрисов // Инженерная геология. – 2017. – № 3. – С. 6-17. – EDN ZEWAЕJ.
6. Брушков, А. В. Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне / А. В. Брушков, А. Г. Алексеев, С. В. Бадина [и др.] // Записки Горного института. – 2023. – Т. 263. – С. 742-756. – EDN IMQTQY.
7. Брушков, А. В. Засоленные многолетнемерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства // – М.: Изд-во МГУ им. МВ Ломоносова. – 1998.
8. Велли, Ю. Я. Здания и сооружения на Крайнем Севере: Справочное пособие / Велли Ю. Я., Докучаев В. В., Федоров Н. Ф. // – Госиздат, 1963.
9. Велли, Ю. Я. Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах / Ю. Я. Велли, В. В. Докучаев, Н. Ф. Федоров // – Л.: Стройиздат. – 1977.
10. Верстов, В. В. Особенности погружения свай в мерзлые грунты / В. В. Верстов, А. Н. Гайдо, Н. А. Егорова // Молодой ученый. – 2018. – №. 20. – С. 135-138. – EDN XNMCQH.
11. Воронков, О. К., Ушакова Л. Ф. Предварительная оценка механических характеристик мерзлых засоленных грунтов // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2022. – Т. 304. – С. 29-47. – EDN CVHAZT.
12. Вотяков, И. Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. – 1975. – С. 20-21.
13. Вялов, С. С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов / –М.: Изд-во АН СССР. – 1959. – 191 с.
14. Вялов, С. С. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений. – АН СССР. – 1962.
15. Гайдаенко, Е. И. Использование льдов в качестве оснований сооружений. – 1978.

16. Гончаров, Ю. М. Эффективные конструкции фундаментов на вечномёрзлых грунтах // – АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения. – Новосибирск : Наука : Сиб. отд-ние. – 1988.
17. ГОСТ 5180-2014. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М.: Стандартиформ. – 2019.
18. ГОСТ 12071-2014. Грунты. Отбор упаковка, транспортирование и хранение образцов. – М.: Стандартиформ. – 2019.
19. ГОСТ 12248.7-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов методом испытания шариковым штампом. – М.: Стандартиформ. – 2020.
20. ГОСТ 12248.8-2020. Грунты. Определение характеристик прочности мерзлых грунтов методом среза по поверхности смерзания. – М.: Стандартиформ. – 2020.
21. ГОСТ 12248.10-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости мерзлых грунтов методом компрессионного сжатия. – М.: Стандартиформ. – 2020.
22. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – М.: Стандартиформ. – 2019.
23. ГОСТ 19281-2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия. – М.: Стандартиформ. – 2021.
24. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. – М.: Стандартиформ. – 2020.
25. ГОСТ 26263-84. Грунты. Метод лабораторного определения теплопроводности мерзлых грунтов. – М.: Государственный комитет СССР по делам строительства.
26. Двойников, М. В. Моделирование решений для размещения арктических нефтегазовых объектов / М. В. Двойников, Г. В. Буслаев, А. А. Куншин, Д. А. Сидоров, Е. С. Лосева, А. Ю. Лаврик // Деловой журнал NEFTEGAZ. RU. – 2022. – № 1. – С. 62–71.
27. Дядькин, Ю. Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. – М: Недра. – 1968. – 13 с.
28. Дядькин, Ю. Д. Исследование и регулирование теплового режима шахт северо-востока / Ю. Д. Дядькин, С. И. Шахов, В. Д. Митенев // Записки Горного института. – 1965. – № 1 (50). – С. 49. – EDN LVHNIK.
29. Евдокимов-Рокотовский, М. И. Постройка и эксплуатация инженерных сооружений в вечной мерзлоте // Томск: Сиб. строит. ин-т. – 1931.
30. Ершов, Э. Д. Общая геокриология. Учебник. – М.: Из-во МГУ. – 2002.
31. Ефимов, В. М. Устройство буронабивных свай в условиях криолитозоны центральной Якутии / В. М. Ефимов, И. И. Рожин, Ф. Е. Попенко, А. В. Степанов, А. А. Степанов, Ю. К. Васильчик // Арктика и Антарктика. – 2018. – № 1 (1). – С. 133–141. – EDN YWEDEY.

32. Жданова, С. М., Нератова О. А. Усиление оснований и фундаментов современными материалами в суровых условиях // Транспорт азиатско-тихоокеанского региона. – 2019. – № 4. – С. 67–74. – EDN KCWPZG.
33. Земеров, И. В. Влияние обводнения на температурный режим мерзлого основания насыпных сооружений : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Земеров Илья Владимирович, 2023. – 120 с. – EDN GLUFDQ.
34. Климат Нарьян-Мара : сайт. – URL: <https://pogodaiklimat.ru/climate/23205.htm> (дата обращения: 23.09.2025). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
35. Курилко, А. С., Иудин, М. М. Каноническое представление влияния циклов замораживания-оттаивания на прочность горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 10. – С. 310–313. – EDN NDBLGF.
36. Ланько, С. В., Куликова, Д. М. Реологические модели мерзлых грунтов // Молодой ученый. – 2023. – (7(454)). – С. 16–22. – EDN TMZGBP.
37. Литвиненко, В. С., Двойников, М. В. Разработка концептуальных решений обустройства шельфа Арктики // Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики : Тезисы докладов международной научной конференции, Санкт-Петербург, 02–04 марта 2020 года. – Санкт-Петербург: Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 2020. – С. 113-116. – EDN ECGBAF.
38. Мельников, В. П. Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века / В. П. Мельников, В. И. Осипов, А. В. Брушков [и др.] // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2021. – № 1. – С. 14-31. – DOI 10.31857/S0869780921010070. – EDN AWPARW.
39. Патент № 2704451 С1 Российская Федерация, МПК E02B 17/00. Способ сооружения морской буровой платформы на мелководном шельфе арктических морей : № 2019104732 : заявл. 19.02.2019 : опубл. 28.10.2019 / В. С. Литвиненко, В. Л. Трушко, М. В. Двойников. – EDN AXHCJW.
40. Патент № 2737319 С1 Российская Федерация, МПК E02B 17/00. Способ сооружения ледостойкой буровой платформы на мелководном шельфе арктических морей : № 2020124230 : заявл. 14.07.2020 : опубл. 27.11.2020 / В. С. Литвиненко, В. Л. Трушко, М. В. Двойников. – EDN YGQTSB.
41. 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.

42. Пинегин, В. Н. Предварительное сообщение об исследовании прочности речного льда в связи с температурными изменениями // Вестник Сиб. инж. – 1924. – Т. 4.

43. Роман, Л. Т. Модуль деформации мерзлых грунтов при компрессионных испытаниях / Л. Т. Роман, П. И. Котов, М. Н. Царапов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. – № 5. – С. 35-40. – EDN XBGXHT.

44. Роман, Л. Т. Предложения к актуализации нормативных документов по строительству в криолитозоне / Л. Т. Роман, П. И. Котов, М. Н. Царапов // Материалы Пятой конференции геокриологов России, Москва, 14–17 июня 2016 года. – Москва: «Университетская книга», 2016. – С. 131-138. – EDN YOUYUJ.

45. Росляков, А. Г., Миронюк, С. Г. Мерзлые грунты шельфа арктических морей: подходы к обнаружению и изучению // Фундаменты. – 2021. – № 1(3). – С. 17-21. – EDN YXIMIA.

46. Сарычев, В. И. Прогнозирование просадки дневной поверхности при проходке подземных выработок / В. И. Сарычев, А. В. Поляков, П. Н. Чеботарев, В. К. Демин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 2. – С. 201-209. – EDN ONXHMW.

47. Сарычев, В. И. Уравнения контактного взаимодействия смежных элементов двухслойной крепи горных выработок / В. И. Сарычев, А. А. Толкачев, А. В. Раков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – № 2. – С. 253-261. – EDN VHINLO.

48. Скуба, В. Н. Исследование устойчивости горных выработок в условиях многолетней мерзлоты / В. Н. Скуба, Новосибирск: Наука, 1974.

49. СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах // Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. – М. – 2020.

50. Стрелецкий, Д. А. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на Севере Западной Сибири / Д. А. Стрелецкий, Н. И. Шикломанов, В. И. Гребенец // Криосфера Земли. – 2012. – Т. 16, № 1. – С. 22-32. – EDN OSJJDB.

51. Султанмагомедов, Т. С. Моделирование продольных перемещений трубопровода в многолетнемерзлых грунтах / Т. С. Султанмагомедов, Р. Н. Бахтизин, С. М. Султанмагомедов, А. Р. Урманова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 4. – С. 87-96. – DOI: 10.18799/24131830/2021/4/3151. – EDN MNZQYE.

52. Сумгин, М. И. Общее мерзлотоведение / М. И. Сумгин, С. П. Качурин, Н. И. Толстихин, В. Ф. Тумель // – М.: Изд-во АН СССР. – 1940.

53. Сумгин, М. И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. – Владивосток, Дальневост. геофиз. обсерватория. – 1927.
54. Сюрпризы вечного льда : информационный портал «Научная Россия» : сайт. –URL: <https://scientificrussia.ru/articles/syurprizu-vechnogo-lda> (дата обращения: 12.07.2023). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
55. Трофимов, В. Т., Красилова, Н. С. Засоленные мерзлые грунтовые толщи арктического побережья России и их инженерно-геологические особенности // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2017. – Т. 92, № 4. – С. 49-57. – EDN YLUBCY.
56. 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.
57. 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.
58. Ухов, С. Б. Механика грунтов, основания и фундаменты : учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов - "Строительство" / Ухов С. Б., Семенов В. В., Знаменский В. В. [и др.] ; Под редакцией С.Б. Ухова. – Изд. 4-е, стереотипное. – Москва : Издательство "Высшая Школа", 2007. – 556 с. – ISBN 978-5-06-003868-2. – EDN QNMXGT.
59. Царапов, М. Н. Закономерности формирования прочностных характеристик оттаивающих грунтов при сдвиге : специальность 25.00.08 "Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение" : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Царапов Михаил Николаевич. – Москва, 2007. – 143 с. – EDN NOPDMH.
60. Цытович, Н. А. Основания механики мерзлых грунтов / Изд-во Академии наук СССР. – 1937. – 432 с.
61. Цытович, Н. А. Исследование упругих и пластических деформаций мерзлых грунтов // Труды КОВМ АН СССР. – 1940. – (10).
62. Цытович, Н. А. К теории равновесного состояния воды в мерзлых грунтах // Изв. АН СССР. Сер. Геология. 1945. № 5. С. 493–502.
63. Цытович, Н. А. Новый принцип механики мерзлых грунтов // Журнал «Мерзлотоведение». – 1946. – № 1 (1).

64. Цытович, Н. А. О незамерзшей воде в рыхлых горных породах // Известия АН СССР. Сер. Геология. – 1947. – № 3. – С. 16–19.
65. Цытович, Н. А. Принципы механики мерзлых грунтов / М.: Изд-во АН СССР. – 1952.
66. Цытович, Н. А. Основания и фундаменты на мерзлых грунтах / Изд-во АН СССР. – 1958.
67. Цытович, Н. А. Механика мерзлых грунтов / М., Высш. шк. – 1973. – 346 с.
68. Цытович, Н. А. Роль советских ученых в развитии механики мерзлых грунтов и фундаментостроения на вечномёрзлых грунтах // Мерзлотные исследования и вопросы строительства. – Коми: Книжное изд-во, 1967. – С. 11-16.
69. Шерстов, В. А. Влияние нерегулируемого теплового режима на условия эксплуатации россыпных шахт Севера / Шерстов В. А., Хохолов Ю. А., Ушницкий И. М. [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № S3. – С. 136-150. – EDN LACDPX.
70. Шерстов, В. А., Скуба, В. Н. Повышение устойчивости выработок россыпных шахт Севера / Новосибирск: Наука. – 1980.
71. Шушерина, Е. П., Бобков, Ю. П. Исследование механических свойств мерзлых грунтов при низких отрицательных температурах (от -10 до -50 С) // В сб.: «Мерзлотные исследования», вып. VIII. Изд-во МГУ. – 1968.
72. Шушерина, Е. П. Сопротивление сдвигу многолетнемерзлых грунтов при оттаивании / Е. П. Шушерина, Р. В. Максимьяк, Г. П. Мартынова // Проблемы геокриологии АН СССР. – 1983. – С. 100-106.
73. Ячевский, Л. А. О вечно мерзлой почве в Сибири и ледяных слоях // Изд-во РГО. – 1889. – № 5 (25).
74. Aksenov, V. I., Kal'bergenov, R. G., Leonov, A. R. Strength characteristics of frozen saline soils // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2003. – № 2 (40). – p. 55–59. DOI: 10.1023/A:1024436118466.
75. Alekseev, A. G., Bezvoley, S. G. Evaluation of Creep Indicators of Plastic-Frozen Soil According to Laboratory and Field Tests // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2023. – № 1 (60). – p. 86–92. DOI: 10.1007/s11204-023-09867-2.
76. Alekseev, A., Zorin, D. Interaction of the augercast micropiles with permafrost // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. (365). – p. 042056. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042056
77. Alnaseef, F. H. et al. An Integrated Model to Optimize Artificial Islands Developments in Shallow Water Fields IPTC. – 2020. DOI: 10.2523/IPTC-19598-MS.
78. Andersland, O. B., Ladanyi, B. Frozen ground engineering. – 2004. – Vol. 414.

79. Andersland, O. B., Sayles, F. H., Ladanyi, B. Mechanical properties of frozen ground / McGraw-Hill Book Co. New York. – 1978. – p. 216–275 c.
80. Angell, V. W., Graham H. J., Post G. J. Case History: Ice Island Drilling Application and Well Considerations in Alaskan Beaufort Sea // SPE Drilling Engineering. – 1991. – № 01 (6). – p. 60–64. DOI: 10.2118/19947-MS.
81. Arenson, L. U., Springman, S. M. Mathematical descriptions for the behaviour of ice-rich frozen soils at temperatures close to 0 °C // Canadian Geotechnical Journal. – 2005. – № 2 (42). – p. 431–442. DOI: 10.1139/t04-109.
82. Aukenthaler, M. The frozen & unfrozen Barcelona Basic Model: A verification and validation of a new constitutive model. – MSc. thesis, Delft University of Technology, 2016.
83. Aukenthaler, M., Brinkgreve, R. B. J., Haxaire, A. Evaluation and application of a constitutive model for frozen and unfrozen soil // Proceedings of the GeoVancouver. – 2016. – p. 1-8.
84. Aukenthaler, M., Brinkgreve, R. B. J., Haxaire, A. A practical approach to obtain the soil freezing characteristic curve and the freezing/melting point of a soil-water system // Proceedings of the GeoVancouver 2016: the 69th Canadian Geotechnical Conference, Vancouver, Canada. – 2016. – p. 397-404.
85. Biggar, K. W., Segor, D. C. Field pile load tests in saline permafrost. I. Test procedures and results // Canadian Geotechnical Journal. – 1993. – № 1 (30). – p. 34–45. DOI: 10.1139/t93-004.
86. Biggar, K. W., Segor, D. C. The strength and deformation behaviour of model adfreeze and grouted piles in saline frozen soils // Canadian Geotechnical Journal. – 1993. – № 2 (30). – p. 319–337. DOI: 10.1139/t93-027.
87. Bowles, H. T. et al. Drilling Considerations on Spray Ice Island Structures: A Case History, OCS-Y-0302 Well No. 1, Beaufort Sea, Alaska SPE. – 1987. DOI: 10.2118/16672-MS.
88. Bray, M. T. The influence of cryostructure on the creep behavior of ice-rich permafrost // Cold Regions Science and Technology. – 2012. – (79–80). – p. 43–52. DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.04.003.
89. Bray, M. T. Secondary creep approximations of ice-rich soils and ice using transient relaxation tests // Cold Regions Science and Technology. – 2013. – (88). – p. 17–36. DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.12.011.
90. Broms, B. B., Yao, L. Y. C. Shear Strength of a Soil After Freezing and Thawing // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. – 1964. – № 4 (90). – p. 1–25. DOI: 10.1061/JSFEAQ.0000629.
91. Burke, G. K. Jet Grouting Systems: Advantages and Disadvantages Reston, VA: American Society of Civil Engineers. – 2004. – p. 875–886. DOI: 10.1061/40713(2004)75.

92. Chen, K. et al. A fast- freezing system to enhance the freezing force of cast-in-place pile quickly in permafrost regions // *Cold Regions Science and Technology*. –2020. – (179). – p. 103140. DOI: 10.1016/j.coldregions.2020.103140.
93. Cherepovitsyn, A., Tsvetkov, P., Evseeva, O. Critical analysis of methodological approaches to assessing sustainability of arctic oil and gas projects // *Journal of Mining Institute*. – 2021. – (249). – p. 463–479. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.15.
94. Dzublo, A. D., Alekseeva, K. V. Engineering and geological conditions for the development of the water part of the Kruzenshtern deposit in the Kara Sea // *Arctic: Ecology and Economy*. – 2020. – № 1(37). – p. 95–108. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-95-108.
95. Fish, A. M. Kinetic nature of the long-term strength of frozen soils // *Proc. 2-nd Intern. Symp. on Ground Freezing*. Trondheim, Norway. – 1980. – p. 95–108.
96. Galkin, A. F., Pankov, V. Yu. Thaw depth prediction in cylindrical underground openings // *Mining informational and analytical bulletin*. – 2022. – № 1. – p. 72–83. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_72.
97. Gandy, D. Carbon steel handbook // *Electric Power Research Institute (EPRI)*. – 2007. – p. 1-172.
98. Ghoreishian, Amiri S. A. et al. Constitutive model for rate-independent behavior of saturated frozen soils // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2016. – № 10 (53). – p. 1646–1657. DOI: 10.1139/cgj-2015-0467.
99. Gilev, N. G. et al. Optimization of capital costs for pile foundations during construction of oil and gas production facilities on permafrost soils // *Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry*. – 2019. – (11). – p. 46–49. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-11-46-49.
100. Guo, Z. et al. Significance analysis of the factors influencing the strength of the frozen soil-structure interface and their interactions in different phase transition zones // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2023. – (50). – p. 103475. DOI: 10.1016/j.csite.2023.103475.
101. He, J. et al. Fractional viscoelastic-plastic constitutive model for frozen soil based on microcosmic damage mechanism // *Mechanics of Materials*. – 2023. – (177). – p. 104545. DOI: 10.1016/j.mechmat.2022.104545.
102. He, M. et al. An Extended Finite Element Method for Heat Transfer with Phase Change in Frozen Soil // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2021. – № 6 (57). – p. 497–505. DOI: 10.1007/s11204-021-09698-z.
103. Hou, X. et al. Field observation of the thermal disturbance and freezeback processes of cast-in-place pile foundations in warm permafrost regions // *Research in Cold and Arid Regions*. – 2023. – № 1 (15). – p. 18–26. DOI: 10.1016/j.rcar.2023.04.001.

104. Jiang, Q. et al. An extended Nishihara model for the description of three stages of sandstone creep // *Geophysical Journal International*. – 2013. – № 2 (193). – p. 841–854. DOI: 10.1093/gji/ggt028.
105. Johnston, G. H., Wiley, J. *Permafrost: engineering design and construction*. 1981.
106. Kadivar, M., Manahiloh, K. N. Revisiting parameters that dictate the mechanical behavior of frozen soils // *Cold Regions Science and Technology*. – 2019. – (163). – p. 34–43. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.04.005.
107. Kuranov, A. D., Basalaeva, P. Influence of dip angle of lithologically nonuniform interburden on horizontal mine opening stability during driving // *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* – 2024. – (3). – p. 17-30. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_17.
108. Ladanyi, B., Morel, J.-F. Effect of internal confinement on compression strength of frozen sand // *Canadian Geotechnical Journal*. – 1990. – № 1 (27). – p. 8–18. DOI: 10.1139/t90-002.
109. Lai, Y. et al. Strength distributions of warm frozen clay and its stochastic damage constitutive model // *Cold Regions Science and Technology*. – 2008. – № 2 (53). – p. 200–215. DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.11.001.
110. Lai, Y. et al. Present situation and prospect of mechanical research on frozen soils in China // *Cold Regions Science and Technology*. – 2013. – (87). – p. 6–18. DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.12.001.
111. Lai, Y., Jin, L., Chang, X. Yield criterion and elasto-plastic damage constitutive model for frozen sandy soil // *International Journal of Plasticity*. – 2009. – № 6 (25). – p. 1177–1205. DOI: 10.1016/j.ijplas.2008.06.010.
112. Lai, Y., Li, J., Li, Q. Study on damage statistical constitutive model and stochastic simulation for warm ice-rich frozen silt // *Cold Regions Science and Technology*. – 2012. – (71). – p. 102–110. DOI: 10.1016/j.coldregions.2011.11.001.
113. Lai, Y., Liao, M., Hu, K. A constitutive model of frozen saline sandy soil based on energy dissipation theory // *International Journal of Plasticity*. – 2016. – (78). – p. 84–113. DOI: 10.1016/j.ijplas.2015.10.008.
114. Lavrik, A., Buslaev, G., Dvoynikov, M. Thermal Stabilization of Permafrost Using Thermal Coils Inside Foundation Piles // *Civil Engineering Journal*. – 2023. – № 4 (9). – p. 927–938. DOI: 10.28991/CEJ-2023-09-04-013.
115. Li, N., Xu, B. A new type of pile used in frozen soil foundation // *Cold Regions Science and Technology*. – 2008. – № 3 (53). – p. 355–368. DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.10.005.
116. Li, S. et al. An improved statistical damage constitutive model for warm frozen clay based on Mohr–Coulomb criterion // *Cold Regions Science and Technology*. – 2009. – № 2–3 (57). – p. 154–159. DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.02.010.

117. Liang, J. et al. A three-stage strength criterion for frozen soils // *Cold Regions Science and Technology*. – 2022. – (201). – p. 103597. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103597.
118. Liao, M. et al. Experimental study and statistical theory of creep behavior of warm frozen silt // *KSCE Journal of Civil Engineering*. – 2016. – № 6 (20). – p. 2333–2344. DOI: 10.1007/s12205-015-0374-4.
119. Liew, M. et al. Synthesis of physical processes of permafrost degradation and geophysical and geomechanical properties of permafrost // *Cold Regions Science and Technology*. – 2022. – (198). – p. 103522. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103522.
120. Lin, C. et al. Experimental study on the shear characteristics of different pile-soil interfaces and the influencing factors // *Cold Regions Science and Technology*. – 2023. – (206). – p. 103739. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103739.
121. Litvinenko, V. S., Dvoynikov, M. V., Trushko, V. L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2022. – № 1 (32). – p. 113–119. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.09.010.
122. Liu, E., Lai, Y. Thermo-poromechanics-based viscoplastic damage constitutive model for saturated frozen soil // *International Journal of Plasticity*. – 2020. – (128). – p. 102683. DOI: 10.1016/j.ijplas.2020.102683.
123. Liu, J., Chang, D., Yu, Q. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand // *Engineering Geology*. – 2016. – (210). – p. 23–32. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.05.019.
124. Liu, X. et al. Study on effect of coarse-grained content on the mechanical properties of frozen mixed soils // *Cold Regions Science and Technology*. – 2019. – (158). – p. 237–251. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.09.001.
125. Liu, Z. et al. The influence of thermophysical properties of frozen soil on the temperature of the cast-in-place concrete pile in a negative temperature environment // *Archives of Thermodynamics*. – 2023. – № 2 (44). DOI: 10.24425/ather.2023.146557.
126. Luo, S. et al. Freeze–Thaw Changes of Seasonally Frozen Ground on the Tibetan Plateau from 1960 to 2014 // *Journal of Climate*. – 2020. – № 21 (33). – p. 9427–9446. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0923.1.
127. Ma, W., Wu, Z., Zhang C. Strength and yield criteria of frozen soil // *Progress in Natural Science-Beijing*. – 1995. – (5). – p. 405–409.
128. McLean, J. et al. Adfreeze Strength of Wooden Piles in Warm Permafrost Soil // *Journal of Cold Regions Engineering*. – 2023. – № 2 (37). DOI: 10.1061/JCRGEI.CRENG-643.
129. Naberezhnyi A., Kuzmin G., Savvina A. Research of Ribbed Piles in Permafrost. – 2020. – p. 105–113. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_11.

130. Nishimura S. et al. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application // *Géotechnique*. – 2009. – № 3 (59). – p. 159–171. DOI: 10.1680/geot.2009.59.3.159.
131. Ogata, K. et al. Purification and N-terminal amino acid sequence of proliferating cell nuclear antigen (PCNA)/cyclin and development of ELISA for anti-PCNA antibodies. // *The Journal of Immunology*. – 1985. – № 4 (135). – p. 2623–2627. DOI: 10.4049/jimmunol.135.4.2623.
132. Plotnikov, A. A., Merzlyakov, V. P. Increasing the Bearing Capacity and Durability of Building Foundations on Frozen Soils // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2021. – № 1 (58). – p. 71–77. DOI: 10.1007/s11204-021-09708-0.
133. Pushkarev, A. et al. Method for selecting and substantiating the parameters of machines for water jet grouting of unstable seasonally frozen soil masses // *Transportation Research Procedia*. – 2021. – (57). – p. 518–529. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.080.
134. Qi, J., Ma, W. A new criterion for strength of frozen sand under quick triaxial compression considering effect of confining pressure // *Acta Geotechnica*. – 2007. – № 3 (2). – p. 221–226. DOI: 10.1007/s11440-007-0034-z.
135. Qi, J., Vermeer, P. A., Cheng G. A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2006. – № 3 (17). – p. 245–252. DOI: 10.1002/ppp.559.
136. Qin, Y. et al. Experimental study for the compressible behavior of warm and ice-rich frozen soil under the embankment of Qinghai–Tibet Railroad // *Cold Regions Science and Technology*. – 2009. – № 2–3 (57). – p. 148–153. DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.02.006.
137. Roman, L. T. Effect of chemical composition of soils on the strength and deformability of frozen saline soils // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 1994. – № 6 (31). – p. 205–210. DOI: 10.1007/BF02335068.
138. Sayles, F. H., Carbee, D. L. Strength of frozen silt as a function of ice content and dry unit weight // *Engineering Geology*. – 1981. – № 1–4 (18). – p. 55–66. DOI: 10.1016/0013-7952(81)90046-6.
139. Semenov, D., Kaloshina, S. Innovative technology construction of artificial islands // *PNRPU Construction and Architecture Bulletin*. – 2016. – № 4 (7). – p. 80–92. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.4.08.
140. Shang, Y. et al. A novel refrigerant system to reduce refreezing time of cast-in-place pile foundation in permafrost regions // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – (128). – p. 1151–1158. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.079.
141. Shang, Y.-H. et al. Thermal and mechanical characteristics of a thermal pile in permafrost regions // *Advances in Climate Change Research*. – 2023. – № 2 (14). – p. 255–266. DOI: 10.1016/j.accre.2022.10.002.

142. Shao, Y. et al. Creep Characteristic Test and Creep Model of Frozen Soil // Sustainability. – 2023. – № 5 (15). – p. 3984. DOI: 10.3390/su15053984.
143. Shastri, A. et al. Mechanical behavior of frozen soils: Experimental investigation and numerical modeling // Computers and Geotechnics. – 2021. – (138). – p. 104361. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104361.
144. Song, B. et al. Creep characteristics and constitutive model for frozen mixed soils // Journal of Mountain Science. – 2021. – № 7 (18). – p. 1966–1976. DOI: 10.1007/s11629-020-6463-y.
145. Soyту, N. Yu. et al. Design of Pile Foundations in Conditions of Freezing Soils. – 2023. – p. 17–28. DOI: 10.1007/978-3-030-99626-0_3.
146. Stähli, M., Stadler, D. Measurement of water and solute dynamics in freezing soil columns with time domain reflectometry // Journal of Hydrology. – 1997. – № 1–4 (195). – p. 352–369. DOI: 10.1016/S0022-1694(96)03227-1.
147. Stoyanov, I. Environmentally friendly material for the construction of pile foundations on permafrost // E3S Web of Conferences. – 2023. – (403). – p. 02015. DOI:10.1051/e3sconf/202340302015.
148. Sun, K. et al. An elastoplastic damage constitutive model for frozen soil based on the super/subloading yield surfaces // Computers and Geotechnics. – 2020. – (128). – p. 103842. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103842.
149. Sun, Z. et al. Mechanical behavior and microstructural evolution of frozen soils under the combination of confining pressure and water content // Engineering Geology. – 2022. – (308). – p. 106819. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106819.
150. Tang, L. et al. The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils // Cold Regions Science and Technology. – 2018. – (145). – p. 197–207. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.10.004.
151. Tang, L. et al. Analysis and research on the difference of design codes for vertical bearing capacity of pile foundation in cold regions // Cold Regions Science and Technology. – 2023. – (206). – p. 103723. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103723.
152. Ting, J. M., Torrence Martin, R., Ladd, C. C. Mechanisms of Strength for Frozen Sand // Journal of Geotechnical Engineering. – 1983. – № 10 (109). – p. 1286–1302. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:10(1286).
153. Tretiakova, O. Model of pile-frozen soil interaction in a closed form // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – Vol. 115. – №. 7. – p. 11501. DOI: 10.34910/MCE.115.1.
154. 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.

155. 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.
156. Viklander, P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw // *Canadian Geotechnical Journal.* – 1998. – № 3 (35). – p. 471–477. DOI: 10.1139/t98-015.
157. Wang, D. et al. Application of ultrasonic technology for physical–mechanical properties of frozen soils // *Cold Regions Science and Technology.* – 2006. – № 1 (44). – p. 12–19. DOI: 10.1016/j.coldregions.2005.06.003.
158. Wang, P. et al. Binary medium creep constitutive model for frozen soils based on homogenization theory // *Cold Regions Science and Technology.* – 2019. – (162). – 35–42. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.03.019.
159. Wang, S. et al. A simple rheological element based creep model for frozen soils // *Cold Regions Science and Technology.* – 2014. – (106–107). – p. 47–54. DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.06.007.
160. Weaver, J. S., Morgenstern, N. R. Pile design in permafrost // *Canadian Geotechnical Journal.* – 1981. – № 3 (18). – p. 357–370. DOI: 10.1139/t81-043.
161. Williams, L. G. The effects of target specification on objects fixated during visual search // *Acta Psychologica.* – 1967. – (27). – p. 355–360. DOI: 10.1016/0001-6918(67)90080-7.
162. Xu, X. et al. Laboratory investigation on strength and deformation characteristics of ice-saturated frozen sandy soil // *Cold Regions Science and Technology.* – 2011. – № 1 (69). – p. 98–104. DOI: 10.1016/j.coldregions.2011.07.005.
163. Xu, X. et al. Strength and deformation characteristics of silty clay under frozen and unfrozen states // *Cold Regions Science and Technology.* – 2020. – (172). – p. 102982. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102982.
164. Yamamoto, Y., Springman, S. M. Axial compression stress path tests on artificial frozen soil samples in a triaxial device at temperatures just below 0 °C // *Canadian Geotechnical Journal.* – 2014. – № 10 (51). – p. 1178–1195. DOI: 10.1139/cgj-2013-0257.
165. Yao, X. et al. A frozen soil creep model with strength attenuation // *Acta Geotechnica.* – 2017. – № 6 (12). – p. 1385–1393. DOI: 10.1007/s11440-017-0554-0.
166. Yao, X. et al. Influence of mechanical properties on the coefficient of lateral earth pressure at rest of frozen soils // *Cold Regions Science and Technology.* – 2020. – (174). – p. 103057. DOI: 10.1016/j.coldregions.2020.103057.
167. Yao, X., Qi, J., Ma, W. Influence of freeze–thaw on the stored free energy in soils // *Cold Regions Science and Technology.* – 2009. – № 2–3 (56). – p. 115–119. DOI: 10.1016/j.coldregions.2008.11.001.

168. You, Y. et al. Causes of pile foundation failure in permafrost regions: The case study of a dry bridge of the Qinghai-Tibet Railway // *Engineering Geology*. – 2017. – (230). – p. 95–103. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.10.004.
169. Yu, F., Guo, P., Na, S. A framework for constructing elasto-plastic constitutive models for frozen and unfrozen soils // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2022. – № 2 (46). – p. 436–466. DOI: 10.1002/nag.3306.
170. Zhang, D. et al. A new strength criterion for frozen soils considering the influence of temperature and coarse-grained contents // *Cold Regions Science and Technology*. – 2017. – (143). – p. 1–12. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.08.006.
171. Zhang, Q., Zhang, C. Nonlinear shear characteristics of frozen loess-concrete interface // *PLOS ONE*. – 2023. – № 8 (18). – p. e0290025. DOI: 10.1371/journal.pone.0290025.
172. Zhang, Z. et al. The freeze-thaw cycles-time analogy method for forecasting long-term frozen soil strength // *Measurement*. – 2016. – (92). – p. 483–488. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.06.044.
173. Zhao, Y., Zhang, M., Gao, J. Research progress of constitutive models of frozen soils: A review // *Cold Regions Science and Technology*. – 2023. – (206). – p. 103720. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103720.
174. Yuanlin, Z. Creep and strength behavior of frozen silt in uniaxial compression. – US Army Corps of Engineers Cold Regions Research & Engineering Laboratory. – 1987. – Vol. 87. – №. 10.
175. Zou, Y. et al. Variation and prediction of unfrozen water content in different soils at extremely low temperature conditions // *Journal of Hydrology*. – 2023. – (624). – p. 129900. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129900.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации



Общество с ограниченной ответственностью
«Центр гидроэкологических исследований»
(ООО «ЦГЭИ»)

199406, г. Санкт-Петербург, Наличная ул., д. 16, лит. А
ОПГН 1027812402474, ИНН 7824091136
E-mail: CGEI@CGEISP.BU
тел (812) 740-63-60
факс (812) 356-10-66

№ 222/1 от 07 мая 2025 г.

Утверждаю:

Генеральный директор

ООО «ЦГЭИ»

Г.И. Болотников

от 7 мая 2025 г.



АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации аспиранта Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, Баевой Елены Константиновны, обучающейся по научной специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

Рабочая комиссия в составе начальника комплексной грунтовой лаборатории Порядкиной Ларисы Николаевны, а также членов комиссии – заместителя начальника комплексной грунтовой лаборатории Колесникова Павла Александровича и ведущего инженера-грунтоведа Бердниковой Анны Михайловны – составила настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Геомеханическое обоснование параметров свайных оснований технологических платформ в условиях криолитозоны», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы 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, в частности, в следующих аспектах:

- обоснования состава лабораторных исследований для определения физико-механических характеристик мерзлых пород;
- регламентации применения достоверных методик расчета;
- регламентации требований к численному моделированию.

Диссертация Баевой Елены Константиновны посвящена разработке рекомендаций по

повышению устойчивости и несущей способности свайных оснований технологических платформ в условиях криолитозоны и прибрежного шельфа, что является стратегически важной задачей для освоения нефтегазовых ресурсов арктического шельфа Российской Федерации. В исследовании поднимаются вопросы:

– обоснования программы лабораторных исследований для выявления зависимостей прочностных и деформационных свойств мерзлых пород от изменяющихся значений внешних факторов;

– обоснования выбора конкретных геомеханических моделей, адекватно описывающих криогенно-механические процессы взаимодействия свайных фундаментов с мерзлыми породами;

– определения параметров геомеханических моделей мерзлых пород, позволяющих учитывать изменение их механических свойств.

Поставленные в диссертационном исследовании задачи решаются посредством обширных экспериментальных исследований в условиях низких температур и численного моделирования в рамках механики сплошной среды при использовании метода конечных элементов.

Использование указанных результатов позволяет ООО «ЦГЭИ» повысить качество и технико-экономическую эффективность инженерно-геологических изысканий для проектирования оснований и фундаментов объектов в регионах с распространением многолетнемерзлых пород. Это достигается за счет более достоверной оценки несущей способности свайных оснований, учета рисков, связанных с деградацией мерзлоты, и разработки научно обоснованных рекомендаций для обеспечения устойчивости и надежности сооружений в сложных условиях криолитозоны.

По результатам совместных разработок получено 0 патентов.

Председатель комиссии:

Начальник комплексной грунтовой
лаборатории
(должность)




(подпись)

/ Порядкина Л.Н. /
(Ф.И.О.)

Члены комиссии:


Заместитель начальника
комплексной грунтовой лаборатории
(должность)



(подпись)

/ Колесников П.А. /
(Ф.И.О.)

Ведущий инженер-грунтовед
(должность)



(подпись)

/ Бердникова А.М. /
(Ф.И.О.)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2841446

СПОСОБ СООРУЖЕНИЯ СВАЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II" (RU)*

Авторы: *Трушко Владимир Леонидович (RU), Климов Владимир Яковлевич (RU), Баева Елена Константиновна (RU), Ожигин Анатолий Юрьевич (RU)*

Заявка № 2024126821

Приоритет изобретения 12 сентября 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 06 июня 2025 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 12 сентября 2044 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **2 841 446**⁽¹³⁾ **C1**
 (51) МПК
E02D 27/35 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
E02D 27/35 (2025.01)

(21)(22) Заявка: 2024126821, 12.09.2024
 (24) Дата начала отсчета срока действия патента:
 12.09.2024
 Дата регистрации:
 06.06.2025
 Приоритет(ы):
 (22) Дата подачи заявки: 12.09.2024
 (45) Опубликовано: 06.06.2025 Бюл. № 16
 Адрес для переписки:
 199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
 ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский горный
 университет императрицы Екатерины II",
 Патентно-лицензионный отдел

(72) Автор(ы):
 Трушко Владимир Леонидович (RU),
 Климов Владимир Яковлевич (RU),
 Баева Елена Константиновна (RU),
 Ожигин Анатолий Юрьевич (RU)
 (73) Патентообладатель(и):
 федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 образования "Санкт-Петербургский горный
 университет императрицы Екатерины II"
 (RU)
 (56) Список документов, цитированных в отчете
 о поиске: RU 2419707 C1, 27.05.2011. RU
 2320821 C1, 27.03.2008. RU 1793752 C, 10.04.1995.
 RU 2039158 C1, 09.07.1995. SU 958595 A1,
 15.09.1982. RU 2133316 C1, 20.07.1999.

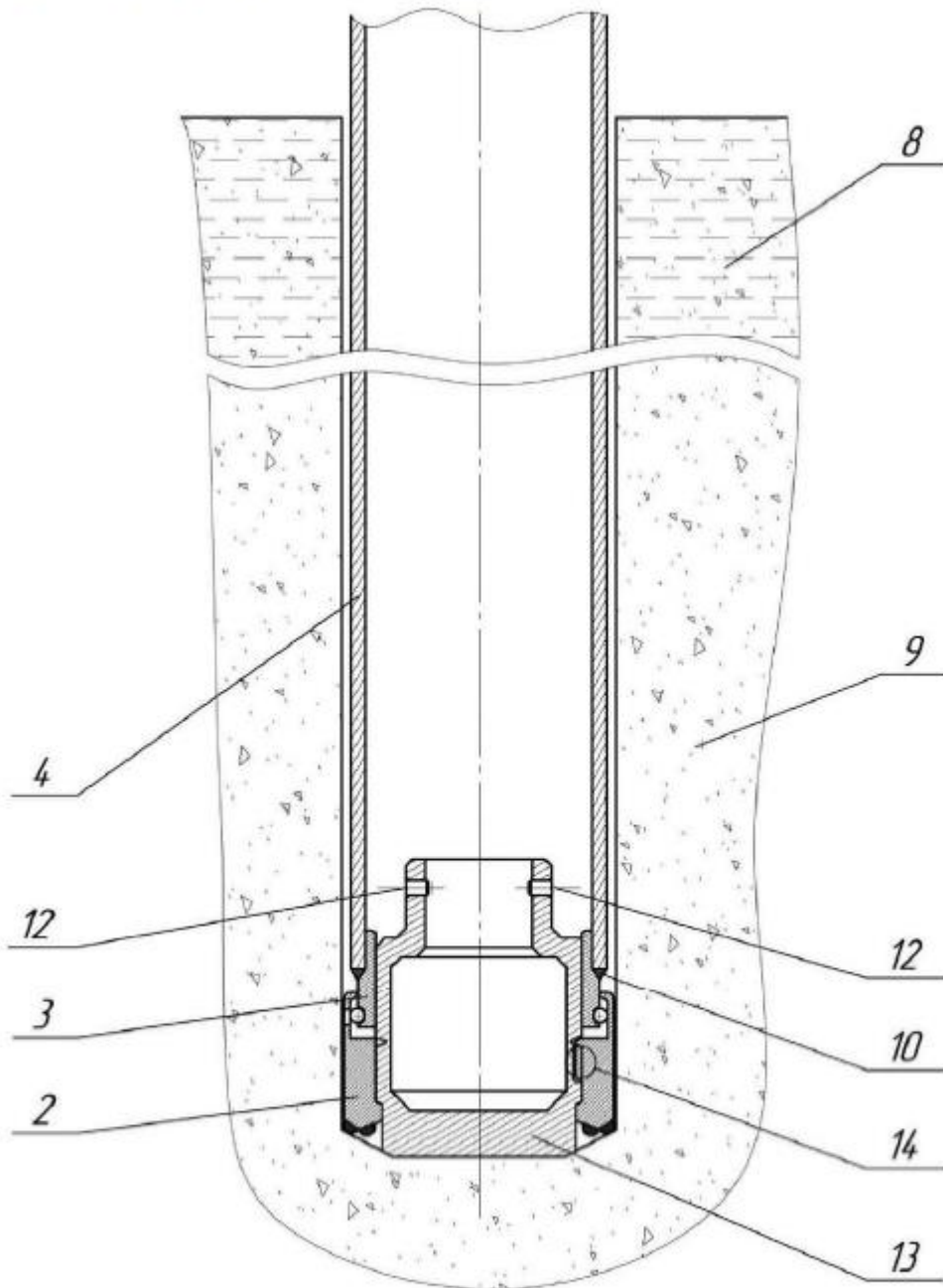
(54) СПОСОБ СООРУЖЕНИЯ СВАЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

(57) Реферат:
 Изобретение относится к области строительства и может быть использовано при возведении свайных оснований технологических платформ зданий и сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов с сохранением грунтов основания в вечномёрзлом состоянии в течение всего срока эксплуатации здания или сооружения. Способ сооружения свай в криолитозоне заключается в том, что собирают буровой снаряд, состоящий из бурильных труб, пневмоударника, пилотного долота, концентричной буровой коронки, собранной с муфтой с возможностью их взаимного вращения, при этом концентричную буровую коронку соединяют с обсадной трубой с помощью неразъемного соединения, а пилотное долото соединяют с муфтой с помощью разъемного байонетного соединения. Производят бурение скважины и одновременно погружают обсадную трубу на проектную отметку через талые грунты и многолетнемерзлые грунты под защитой

обсадной трубы, не вызывая обрушение стенок скважины, после чего байонетное соединение разъединяют, пилотное долото, пневмоударник и бурильные трубы извлекают из скважины, при этом обсадную трубу, соединенную с концентричной буровой коронкой и муфтой, оставляют в скважине на проектной отметке. Внутри обсадной трубы с помощью бурильных труб и инструмента для спуска пробки-пяты устанавливают пробку-пяту, причем при спуске пробки-пяты в зону расположения муфты выполняют поворот бурильных труб и собирают байонетное соединение, обеспечивая неподвижность пробки-пяты относительно обсадной трубы вдоль вертикальной оси строительной конструкции. Создают дополнительное вертикальное усилие на бурильные трубы, срезают заклепки и извлекают бурильные трубы совместно с инструментом для спуска пробки-пяты, далее обсадную трубу с установленной пробкой-пятой оставляют в

состоянии покоя без приложения строительной нагрузки для смерзания наружной поверхности обсадной трубы и пробки-пяты с многолетнемерзлыми грунтами. Техническим

результатом является увеличение несущей способности и возможность демонтажа сваи. 2 табл., 5 ил.



RU 2841446 C1

RU 2841446 C1

Фиг. 4