

УДК 69.07

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬСТВА ФУНДАМЕНТОВ НА МНОГОЛЕТНИХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ БУРООПУСКНЫХ СВАЙ НА ММГ

© 2025 И.Д. Карпов¹, Ю. С. Клочков², Б. С. Ермаков¹, С. Б. Ермаков², А. А. Альхименко¹

¹ Научно-технологический комплекс «Новые технологии и материалы»,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

² Центр технологических инициатив,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Статья поступила в редакцию 01.12.2025

Представлены результаты численного моделирования буропускной стальной сваи диаметром 219 мм из стали марки 09Г2С, выполненного в программном комплексе ANSYS Workbench с учётом как вертикальных, так и комбинированных (вертикальных, горизонтальных и моментных) нагрузок. Моделирование проведено для условий многолетнемерзлых грунтов (ММГ) опытного полигона в г. Якутске и включает двухслойную геологическую модель: сезонно-талый пылеватый песок (0–2 м) и многолетнемерзлый суглинок (2–15 м). Для повышения физической достоверности расчётов использованы упругопластические модели грунтов – MO Granular для талого слоя и Cam-Clay для мерзлого, а также учтено наличие цементно-песчаной смеси (ЦПС), заполняющей полость сваи и образующей внешнюю оболочку. Проведено сравнение результатов с данными натурных испытаний 18 свай и с предыдущей моделью, разработанной в MIDAS GTS NX. Показано, что при вертикальной нагрузке 98,1 кН осадка составляет 4,67 мм, а максимальные напряжения – 22,24 МПа; при комбинированной нагрузке осадка возрастает до 16,5 мм, а напряжения – до 23,5 МПа, локализуясь в зоне контакта «свая–ЦПС–воздух». Все значения значительно ниже предела текучести стали 09Г2С (345 МПа), что подтверждает работоспособность конструкции. Установлено, что применение физически обоснованных моделей грунта в ANSYS обеспечивает более точное описание напряжённо-деформированного состояния по сравнению с упрощённой моделью Мора–Кулона, однако требует калибровки по натурным данным для учёта реальных неоднородностей и дефектов. Результаты работы способствуют повышению качества и надёжности проектирования свайных фундаментов на ММГ, особенно в условиях реализации стратегических инфраструктурных проектов в Арктической зоне РФ.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, стальные сваи, MIDAS GTS NX, численное моделирование, освоение арктики, напряженнодеформированное состояние, вертикальные и горизонтальные нагрузки, метод конечных элементов.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-6-166-1775

EDN: UOYNQH

Благодарность

Исследование выполнено за счет средств государственной программы по Приоритету 2030 от 04.04.25 № 075-15-2025-210 «Повышение качества и надёжности строительства фундаментов на многолетних мерзлых грунтах на основе компьютерного моделирования устойчивости буропускных свай (шифр: КНТН-1-9)». *

ВВЕДЕНИЕ

Освоение территорий с многолетнемерзлыми грунтами требует решения сложных инженерных задач, связанных с обеспечением долговечности и надёжности строительных конструкций. Особое значение имеет применение численного моделирования, которое позволяет учитывать различные факторы воздействия на фундаменты, включая климатические условия, грунтовые характеристики и наличие дефектов в конструкциях.

В нашей предыдущей работе [1] была разработана модель стальной сваи диаметром 219 мм из стали марки 09Г2С с использованием программного комплекса MIDAS GTS NX, при этом учитывались только вертикальные нагрузки. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования той же конструкции в программном комплексе ANSYS с учетом дополнительных горизонтальных нагрузок и момента сил, что позволяет более полно оценить устойчивость сваи в сложных условиях.

Карпов Иван Дмитриевич. E-mail: karpov_id@spbstu.ru

Клочков Юрий Сергеевич, доктор технических наук. E-mail: general@tyuiu.ru

Ермаков Борис Сергеевич, доктор технических наук. E-mail: ermakov55@bk.ru

Ермаков Сергей Борисович, кандидат технических наук. E-mail: ermakovsb@tyuiu.ru

Альхименко Алексей Александрович, кандидат технических наук. E-mail: a.alkhimenko@spbstu.ru

АКТУАЛЬНОСТЬ И ПРОБЛЕМАТИКА

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью решения технических проблем, связанных с освоением территорий, где распространены многолетнемерзлые грунты (ММГ). В условиях реализации национальной стратегии развития Арктики и других регионов с экстремальными природно-климатическими условиями вопросы обеспечения устойчивости и долговечности фундаментов становятся особенно важными.

Многолетнемерзлые грунты обладают уникальными свойствами – морозное пучение, криогенные деформации и значительные температурные колебания, что существенно усложняет процесс проектирования и строительства. Проблематика заключается в том, что традиционные методы оценки устойчивости свайных фундаментов в таких условиях не всегда учитывают влияние современных технологических решений, таких как применение цементно-песчаных смесей (ЦПС) для повышения стойкости конструкций к негативным факторам, включая морозное пучение. Кроме того, недостаточно изучено поведение стальных свай в ММГ под воздействием сложных геологических процессов и изменений климата, что затрудняет точный прогноз их работы и надежности.

Цель – повышение качества фундаментов на многолетнемерзлых грунтах за счёт применения численного моделирования устойчивости буроопускных стальных свай в программном комплексе ANSYS, а также сравнения результатов с данными натурных испытаний и предыдущей моделью, выполненной в MIDAS GTS NX. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Провести численное моделирование поведения стальной буроопускной сваи диаметром 219 мм из стали марки 09Г2С в ANSYS под действием вертикальной нагрузки.
2. Провести численное моделирование поведения стальной буроопускной сваи диаметром 219 мм из стали марки 09Г2С в ANSYS под действием комбинированных нагрузок (вертикальной, горизонтальной и момента сил).
3. Выполнить анализ НДС конструкции: осадка, максимальные напряжения.
4. Сравнить результаты моделирования с данными натурных испытаний 18 свай, установленных на полигоне в Якутске, и с результатами модели, выполненной в MIDAS GTS NX.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является стальная буроопускная свая со следующими характеристиками:

- материал – сталь марки 09Г2С;
- длина – 10 м;
- наружный диаметр – 219 мм;
- толщина стенки – 8 мм;
- внутреннее заполнение – цементно-песчаная смесь (ЦПС) на глубину 10 м;
- внешняя оболочка – слой ЦПС толщиной 50 мм, формируемый вокруг сваи на глубине 0–9 м.

Грунтовые условия соответствуют данным инженерно-геологических изысканий на опытном полигоне в г. Якутске и включают два инженерно-геологических элемента:

- ИГЭ-44507 – сезонно-талый пылеватый песок средней плотности, водонасыщенный, залегающий на глубине 0–2 м;
- ИГЭ-208031 – многолетнемерзлый суглинок твёрдомерзлый, слоисто-сетчатой криотекстуры, слабобльдистый, залегающий на глубине 2–15 м.

Для численного моделирования использован САЕ-комплекс ANSYS Workbench, включающий модуль Static Structural. Выбор ANSYS обусловлен:

- высокой точностью решения задач механики деформируемого твёрдого тела;
- возможностью моделирования сложных контактных взаимодействий «свая – ЦПС – грунт»;
- поддержкой нелинейных материалов и многокомпонентных нагрузок (вертикальная сила, горизонтальная сила, изгибающий момент);
- широким применением в инженерной практике и научных исследованиях строительных конструкций на сложных грунтах.

Результаты сопоставлены с данными натурных испытаний 18 буроопускных свай, установленных на полигоне в Якутске, а также с предыдущей моделью, разработанной в MIDAS GTS NX [1].

1. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

1.1. Физико-механические свойства материалов

Для численного моделирования в программном комплексе ANSYS приняты следующие модели материалов:

■ Цементно-песчаная смесь (ЦПС) - линейно-упругая изотропная модель с параметрами, указанными в таблице 1.

Таблица 1. Физико-механические свойства цементно-песчаной смеси (ЦПС).

Параметр	Значение	Единица измерения
Плотность (Density)	2300	кг/м ³
Коэффициент теплового расширения (Coefficient of Thermal expansion)	1,4E-05	°C ⁻¹
Модуль Юнга (Young's Modulus)	3E+10	Па
Коэффициент Пуассона (Poisson's Ratio)	0,18	
Модуль объемной упругости (Bulk Modulus)	1,5625E+10	Па
Модуль сдвига (Shear Modulus)	1,2712E+10	Па
Предел прочности при растяжении (Tensile Ultimate Strength)	5E+06	Па
Предел прочности при сжатии (Compressive Ultimate Strength)	4,1E+07	Па
Изотропная теплопроводность (Isotropic Thermal Conductivity)	0,72	Вт / м ⁻¹ *°C ⁻¹
Удельная теплоемкость при постоянном давлении (Specific Heat Constant Pressure), C _p	780	Дж / кг ⁻¹ * °C ⁻¹

Для цементно-песчаной смеси (ЦПС), заполняющей полость сваи и образующей внешнюю оболочку толщиной 50 мм, в программном комплексе ANSYS принята линейно-упругая изотропная модель. Такой подход оправдан на этапе оценки напряжённо-деформированного состояния в пределах упругой стадии работы, что характерно для начальных расчётов упрочнённых грунтовых конструкций. Подобная модель применялась в работах [2-4].

■ Сталь 09Г2С - линейно-упругая изотропная модель с параметрами, указанными в таблице 2.

Таблица 2. Физико-механические свойства сваи из стали 09Г2С

Параметр	Значение	Единица измерения
Плотность (Density)	7850	кг/м ³
Изотропный секущий коэффициент теплового расширения (Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion)	1,2E-05	°C ⁻¹
Модуль Юнга (Young's Modulus)	2E+11	Па
Коэффициент Пуассона (Poisson's Ratio)	0,3	
Объемный модуль (Bulk Modulus)	1,6667E+11	Па
Модуль сдвига (Shear Modulus)	7,6923E+10	Па
Предел текучести при растяжении (Tensile Yield Strength)	2,5E+08	Па
Предел текучести при сжатии (Compressive Yield Strength)	2,5E+08	Па
Предел прочности при растяжении (Tensile Ultimate Strength)	4,6E+08	Па
Изотропная теплопроводность (Isotropic Thermal Conductivity)	60,5	Вт / м ⁻¹ *°C ⁻¹
Удельная теплоемкость при постоянном давлении (Specific Heat Constant Pressure, C _p)	434	Дж / кг ⁻¹ * °C ⁻¹
Изотропная относительная проницаемость (Isotropic Relative Permeability)	10000	
Изотропное удельное сопротивление (Isotropic Resistivity)	1,7E-07	Ом*м

Для стальной сваи в программном комплексе ANSYS была принята линейно-упругая изотропная модель (Isotropic Elastic) [5-7]. Это обусловлено тем, что в рамках настоящего исследования основной интерес представляет оценка напряжённо-деформированного состояния конструкции при нагрузках, не превышающих предел упругости материала, а также сопоставимость результатов с предыдущей моделью, выполненной в MIDAS GTS NX.

■ Сезонно-талый слой (ИГЭ-44507, 0–2 м) - упругопластическая модель MO Granular с параметрами, указанными в таблице 3.

Таблица 3. Физико-механические свойства сезонно талого слоя.

Параметр	Значение	Единица измерения
Плотность (Density)	1940	кг/м ³
Модуль Юнга (Young's Modulus)	1,3E+06	Па
Коэффициент Пуассона (Poisson's Ratio)	0,3	
Модуль объёмной упругости (Bulk Modulus)	1,0833E+06	Па
Модуль сдвига (Shear Modulus)	5E+05	Па
Модуль сдвига (Shear Modulus)	7,69E+07	Па
Максимальное давление при растяжении (Maximum Tensile Pressure)	-0,001	Па
Плотность твёрдой фазы (Solid Density)	2660	кг/м ³

Для сезонно-талого слоя (ИГЭ-44507, 0–2 м) в программном комплексе ANSYS применена упругопластическая модель MO Granular [8-10] - модификация модели Кэм-Клей, ориентированная на описание поведения гранулированных грунтов. Модель учитывает нелинейную зависимость деформационных характеристик от уровня напряжений, а также процессы упрочнения при сдвиге и сжатии, что особенно важно при анализе взаимодействия сваи с грунтом под комбинированным нагружением. По сравнению с моделью Мора–Кулона, использованной ранее в MIDAS GTS NX, применение MO Granular позволило повысить физическую достоверность расчётов и обеспечить более корректное описание напряжённо-деформированного состояния системы «свая – ЦПС – грунт».

■ Многолетнемерзлый грунт (ИГЭ-208031, 2–15 м) - упругопластическая модель Cam-Clay с параметрами, указанными в таблице 4.

Таблица 4. Физико-механические свойства вечномерзлого грунта.

Параметр	Значение	Единица измерения
Параметр наклона пластической поверхности (Plastic Slope Parameter)	1	
Наклон линии критического состояния (Slope of Critical State Line)	1	
Начальный размер поверхности текучести (Initial Size of Yield Surface)	0,3	MPa
Минимальный размер поверхности текучести (Minimal Size of Yield Surface)	0,03	MPa
Сухая часть модификатора поверхности текучести (Dry Part of Yield Surface Modifier)	1	
Увлажняющая часть модификатора поверхности текучести (Wetting Part of Yield Surface Modifier)	1	
Параметр анизотропной поверхности текучести (Anisotropic Yield Surface Parameter)	1	
Индекс набухания (Swell Index)	0,03	
Предел упругости при растяжении (Elastic Limit of Tensile Strength)	0,03	MPa
Коэффициент Пуассона (Poisson's Ratio)	0,3	
Начальное отношение пор (Initial Void Ratio)	0,75	

Для нижнего слоя многолетнемерзлого грунта (глубина 2–15 м) в программном комплексе ANSYS использована упругопластическая модель Cam-Clay [11–14], адаптированная для описания поведения связных мерзлых грунтов. Данная модель позволяет учитывать нелинейную зависимость деформаций от напряжений, а также процессы упрочнения и разупрочнения при изменении плотности и влажности грунта – что особенно важно для условий криогенных деформаций и температурных колебаний, характерных для вечной мерзлоты. Применение модели Cam-Clay вместо упрощённой модели Мора–Кулона, использованной ранее в MIDAS GTS NX, позволило более точно описать физическое поведение мерзлого суглинка с криотекстурой, включая его реакцию на вертикальные и горизонтальные нагрузки, а также потенциальное развитие пластических деформаций в зоне контакта со свайей.

1.2. Программный комплекс и сценарии нагружения

Моделирование выполнено в CAE-комплексе ANSYS Workbench (модуль Static Structural)[15–17]. Рассмотрены два сценария нагружения:

- А) Сценарий 1 - вертикальная сжимающая сила $N = 98,1$ кН (соответствует массе 10 т).
- Б) Сценарий 2 - комбинированная нагрузка:

Таблица 5. Нагрузки на сваю

Обозначение	Нагрузка на сваю
N , кН	118,0
Q_x , кН	34,0
Q_y , кН	25,5
M_x , кН·м	28,3

Нагрузки соответствуют усилиям, передаваемым на сваю в составе опоры линейной части трубопровода.

1.3. Граничные условия

Нижняя и боковые поверхности грунтового массива зафиксированы по всем степеням свободы ($u_x = u_y = u_z = 0$). Учтено ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с² для корректного учёта собственного веса конструкции [18–19].

1.4. Конечно-элементная модель и качество сетки

Модель построена с использованием тетраэдрических конечных элементов типа SOLID187 [20]. Общее число элементов - 776 753, узлов - 1 207 314. Сетка сформирована с адаптивным измельчением в зонах контакта сваи с ЦПС и на границе раздела грунтовых слоёв. Минимальный размер элемента - 10–15 мм.

Из общего числа элементов:

- Tet10 - 742 087 шт.,
- Wedge15 - 34 666 шт. (переходные элементы).

Качество сетки оценено по метрике Element Quality:

- более 95 % элементов имеют значение 0,8–1,0;
- элементов с качеством ниже 0,6 нет.

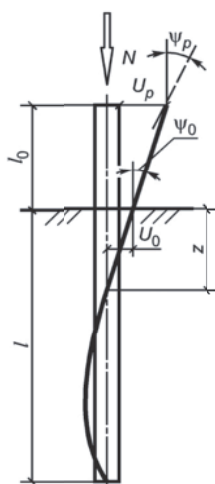


Рисунок 1 - Схема нагрузок на сваю вариант А

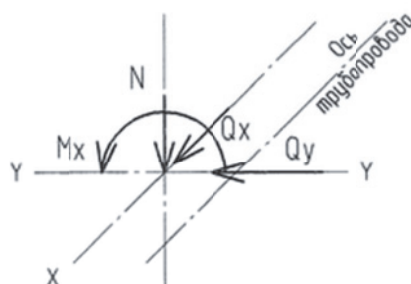
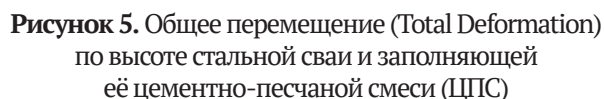
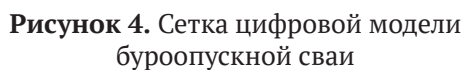
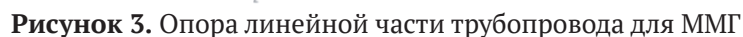


Рисунок 2 - Схема нагрузок на сваю вариант Б



На рис. 5 показано распределение общего перемещения (Total Deformation) по высоте стальной сваи и заполняющей её цементно-песчаной смеси (ЦПС). Это значение представляет собой осадку конструкции под действием вертикальной нагрузки $N = 98,1$ кН (10 тонн).

На рис. 6 показано распределение эквивалентных напряжений (von Mises Stress) по высоте стальной сваи при действии вертикальной сжимающей силы $N = 98,1$ кН (10 тонн).

На рисунке 7 показано распределение общего перемещения (Total Deformation) по высоте стальной сваи и заполняющей её ЦПС при действии комбинированной нагрузки:

- Максимальная осадка составляет 16,5 мм и наблюдается в нижней части сваи, где происходит основное вдавливание в мерзлый грунт. Распределение перемещений указывает на наличие наклона сваи под действием горизонтальной силы и момента.

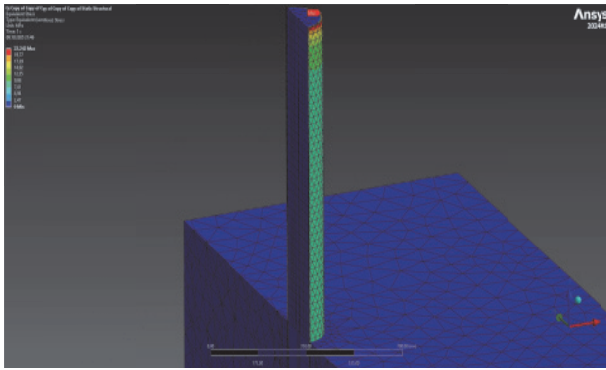


Рисунок 6. Распределение эквивалентных напряжений (von Mises Stress) по высоте стальной сваи

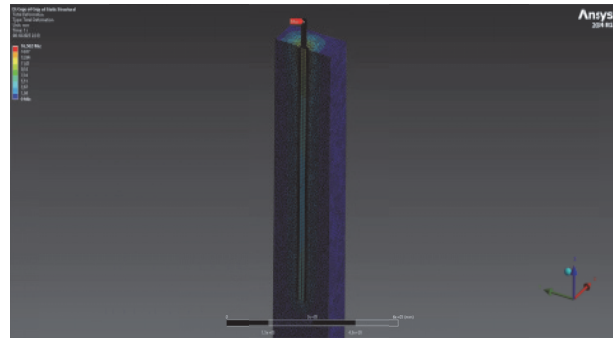


Рисунок 7. Распределение общего перемещения (Total Deformation) по высоте стальной сваи и заполняющей её ЦПС при действии комбинированной нагрузки

2.4. Распределение эквивалентных напряжений при комбинированной нагрузке (Сценарий 2)

На рисунке 8 показано распределение эквивалентных напряжений (von Mises Stress) по высоте стальной сваи и заполняющей её ЦПС при действии комбинированной нагрузки:

- Вертикальная сила $N = 118,0$ кН;
- Горизонтальная сила $Q_x = 34,0$ кН;
- Изгибающий момент $M_y = 28,3$ кН·м.

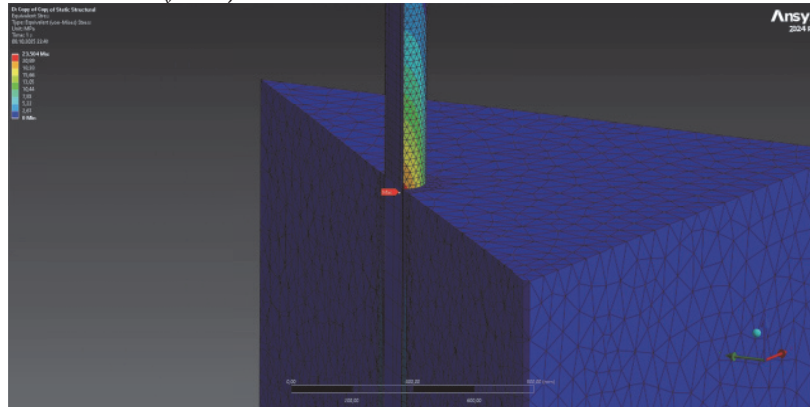


Рисунок 8. Распределение эквивалентных напряжений (von Mises Stress) по высоте стальной сваи и заполняющей её ЦПС при действии комбинированной нагрузки

Максимальные напряжения составляют 23,5 МПа и локализованы в зоне контакта стальной сваи с цементно-песчаной смесью (ЦПС), вблизи границы «свая–воздух–ЦПС».

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

3.1. Обработка натурных данных методом трёх сигм

Результаты натурных испытаний 18 свай на полигоне в г. Якутске [1] показали значительный разброс осадок: от 1,4 мм до 104,7 мм, при среднем значении $\mu = 17,4$ мм. Такой диапазон обусловлен естественной неоднородностью мерзлого грунтового массива, различиями в технологии монтажа и локальными особенностями криотекстуры.

Для повышения достоверности сравнения был применён статистический критерий трёх сигм ($\mu \pm 3\sigma$). Приближённое значение стандартного отклонения оценено по формуле:

$$\sigma \approx 6\max - \min = 6104,7 - 1,4 \approx 17,2 \text{ мм.} \quad (1)$$

Тогда верхняя граница допустимого диапазона:

$$\mu + 3\sigma = 17,4 + 3 \cdot 17,2 \approx 69,0 \text{ мм.} \quad (2)$$

Значение 104,7 мм выходит за пределы $\mu + 3\sigma$ и классифицируется как статистический выброс. После его исключения диапазон осадок составляет 1,4–69,0 мм, а скорректированное среднее значение – $\approx 15,8$ мм. Аналогичный анализ для напряжений (диапазон 25–101 МПа) не выявил выбросов: все значения укладываются в пределы $\mu \pm 3\sigma$.

3.2. Сравнение расчётных и экспериментальных данных

Сравнение выполнено по двум ключевым параметрам: осадка и максимальные эквивалентные напряжения (von Mises) при вертикальной нагрузке $N = 98,1$ кН (10 тонн).

Таблица 6. Сравнение результатов цифровых и натурных испытаний буроопускной сваи

Параметр	MIDAS GTS NX	ANSYS	Натурные испытания
Осадка, мм	35	4,67	1,4 - 69
Макс. напряжение, МПа	29	22,24	25 - 101

Анализ результатов:

А) Осадка

Расчёт в MIDAS [1] (35 мм) находится внутри скорректированного диапазона (1,4–69,0 мм), но ближе к его верхней границе. Это связано с использованием упрощённой модели грунта (Мора–Кулона), которая не учитывает упрочнение и нелинейную сжимаемость.

Расчёт в ANSYS (4,67 мм) соответствует нижней части диапазона, что объясняется более жёстким поведением системы за счёт применения физически обоснованных моделей (MO Granular и Cam-Clay), а также идеализацией граничных условий (отсутствие учёта локальных дефектов и неоднородностей).

Б) Напряжения

Значение 29 МПа (MIDAS) находится в пределах измеренного диапазона (25–101 МПа).

Значение 22,24 МПа (ANSYS) не входит в диапазон натурных измерений, так как ниже нижней границы (25 МПа). Расхождение составляет ≈11%.

Возможные причины занижения напряжений в ANSYS:

- отсутствие учёта локальных концентраторов напряжений (дефекты сварных швов, геометрические несовершенства), присутствующих в натурных сваях;
- более жёсткое взаимодействие «свая–ЦПС–грунт» за счёт точного описания контакта;
- идеализация однородности грунтового массива, в то время как в натуре наблюдаются линзы льда, трещины и зоны ослабления.

3.3. Выводы по адекватности цифровых моделей

1 - MIDAS GTS NX обеспечивает консервативную, но безопасную оценку осадки и напряжений, находящуюся в пределах натурального разброса. Подходит для предварительных расчётов.

2 - ANSYS даёт более физически достоверное описание НДС, однако занижает абсолютные значения из-за отсутствия учёта реальных дефектов и неоднородностей. Требуется калибровка по данным натурных испытаний.

Обе модели подтверждают работоспособность конструкции: максимальные напряжения значительно ниже предела текучести стали 09Г2С (345 МПа).

Таким образом, комплексное использование обеих моделей - с последующей верификацией по натурным данным - позволяет повысить надёжность проектирования фундаментов на ММГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено численное моделирование буроопускной стальной сваи под действием как вертикальной, так и комбинированной нагрузки (включая горизонтальную силу и изгибающий момент). Показано, что:

- при вертикальной нагрузке максимальные напряжения составляют 22,24 МПа, осадка - 4,67 мм;
- при комбинированной нагрузке напряжения возрастают до 23,5 МПа и концентрируются в зоне контакта «свая–ЦПС–воздух», а осадка увеличивается до 16,5 мм с явным наклоном сваи.

Показано, что максимальные напряжения (22,24–23,5 МПа) значительно ниже предела текучести стали 09Г2С (345 МПа), а осадки находятся в пределах, наблюдаемых при натурных испытаниях (после статистической фильтрации выбросов). Тем самым подтверждена работоспособность конструкции и валидность подхода к моделированию системы «свая–ЦПС–грунт».

Вклад работы в практику строительства на ММГ заключается в следующем:

- продемонстрировано использования физически обоснованных упругопластических моделей грунтов (MO Granular и Cam-Clay), модели Мора–Кулона;
- подтверждена эффективность ЦПС как средства повышения жёсткости и устойчивости сваи в условиях криогенных деформаций;

Ограничения модели:

- использована линейно-упругая модель для стали и ЦПС, что не учитывает возможные пластические деформации и трещинообразование;
- не рассмотрено влияние температурных полей и деградации мерзлого грунта во времени;
- отсутствует моделирование реальных дефектов сварных швов, что привело к занижению расчётных напряжений по сравнению с натурными данными.

Тем не менее, полученные результаты создают основу для дальнейшего развития цифровых двойников свайных фундаментов на ММГ и могут быть использованы при проектировании линейных сооружений в Арктической зоне РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Karpov, I. D. Application of computer modeling to improve the quality and stability of bored piles in the construction of foundations on permafrost soils / I. D. Karpov, B. S. Ermakov, O. V. Shvetsov, S. B. Ermakov // Digital engineering and organization of knowledge-intensive industries: Collection of abstracts of reports from the national scientific and practical conference with international participation (St. Petersburg, May 30, 2025). - St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2025. - P. 94-105. - EDN UDISMB.
2. Wang L., Zhang X., Li Q. Numerical analysis of cement-soil mixing piles in soft ground using ANSYS // Geotechnical and Geological Engineering. - 2020. - Vol. 38, № 3. - P. 1125-1137.
3. Ruiz-Ripoll M. L., Riedel W., Stocchi A. et al. Experimental and Numerical Characterization of Granular Material Until Shock Loading // Journal of Dynamic Behavior of Materials. - 2025. - Vol. 11, № 1. - P. 45-69.
4. Yu H., Qi J., Lai Y. et al. Constitutive modeling of frozen soil based on elastoplastic framework and its application in geotechnical engineering // Cold Regions Science and Technology. - 2020. - Vol. 178. - Art. 103123.
5. Ji, Y. J., Jia, K., Yu, Q. H., et al. (2017). Direct shear tests of freezing strength at the interface between cast-in-situ concrete and frozen soil. Journal of Glaciology and Geocryology, 39(1), 86-91.
6. Shang, Y. H., Niu, F. J., Liu, M. H., et al. (2017). Long-term effect of a pile foundation on ground temperatures in permafrost regions. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(9), 2313-2323.
7. Wang, T. F., Liu, J. K., Tai, B. W., et al. (2017b). Frost jacking characteristics of screw piles in seasonally frozen regions based on thermo-mechanical simulations. Computers and Geotechnics, 91, 27-38.
8. Wang, T. F., Liu, J. K., Tian, Y. D., et al. (2017a). Frost jacking characteristics of screw piles by model testing. Cold Regions Science and Technology, 138, 98-107.
9. Chen, L. Z., Wen, Z., Dong, S. S., et al. (2016). Study of the constitutive model of interface between frozen Qinghai-Tibetan silt and reinforced plastic fiberglass. Journal of Glaciology and Geocryology, 38(2), 402-408.
10. Fu, J., Jiang, Y., Peng, H., et al. (2016). Early refreezing law of large-diameter cast-in-place piles in permafrost regions. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 16(4), 104-111.
11. Gu, Q., Yang, Z. H., & Peng, Y. (2016). Parameters affecting laterally loaded piles in frozen soils by an efficient sensitivity analysis method. Cold Regions Science and Technology, 121, 42-51.
12. Guo, L., Yu, Q. H., You, Y. H., et al. (2016). Cooling effects of thermosyphons in tower foundation soils in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Power Transmission Line from Golmud, Qinghai Province to Lhasa, Tibet Autonomous Region, China. Cold Regions Science and Technology, 121, 196-204.
13. He, F., Wang, X., Jiang, D. J., et al. (2016). Thoughts on the research of behaviors of frozen soil-structure interface. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 12(S1), 133-139.
14. Jiang, D. J., & Guo, C. X. (2016). Long-term stability of bearing capacity of single pile in permafrost area on Qinghai-Tibetan Plateau. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 36(2), 59-65.
15. Mu, Y. H., Wang, G. S., Yu, Q. H., et al. (2016b). Thermal performance of a combined cooling method of thermosyphons and insulation boards for tower foundation soils along the Qinghai-Tibet Power Transmission Line. Cold Regions Science and Technology, 121, 226-236.
16. Mu, Y. H., Yu, Q. H., Ma, W., et al. (2016a). Numerical study of long-term cooling effects of thermosyphons around tower footings in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Power Transmission Line. Cold Regions Science and Technology, 121, 237-249.
17. Perreault, P., & Shur, Y. (2016). Seasonal thermal insulation to mitigate climate change impacts on foundations in permafrost regions. Cold Regions Science and Technology, 132, 7-18.
18. Wang, J. F., Jia, K., Rafique, R., et al. (2016b). Changes of backfill soil of tower foundation in the permafrost regions with warm ice-rich frozen soil on the Qinghai-Tibet Plateau. Environmental Earth Sciences, 75(21), 1416.
19. Wen, Z., Yu, Q. H., Ma, W., et al. (2016). Experimental investigation on the effect of fiberglass reinforced plastic cover on adfreeze bond strength. Cold Regions Science and Technology, 131, 108-115.
20. Wu, Y. P., Liu, Z., Wang, N., et al. (2016). Experimental study of the thermal effect of pile bottom water on the rheological property of model pile-frozen soil. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 35(S1), 3424-3431.

IMPROVING THE QUALITY OF FOUNDATION CONSTRUCTION ON PERMAFROST: COMPARISON OF NUMERICAL SIMULATION RESULTS WITH FIELD TEST DATA OF DRILLED-AND-GROUTED STEEL PILES IN PERMAFROST CONDITIONS

© 2025 I.D. Karpov¹, Y.S. Klochkov², B.S. Ermakov¹, S.B. Ermakov², A.A. Alkhimenko¹

¹ Scientific and Technological Complex “Advanced Technologies and Materials”,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia.

² Center for Technological Initiatives, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

The results of numerical modeling of a drilled-and-grouted steel pile (outer diameter 219 mm, steel grade 09G2S) performed in the ANSYS Workbench software suite, considering both vertical and combined loading conditions (vertical force, lateral force, and bending moment). The simulation was carried out for permafrost conditions at an experimental test site in Yakutsk, Russia, using a two-layer geological model: seasonally thawed silty sand (0–2 m depth) and perennially frozen clayey soil (2–15 m depth). To enhance the physical realism of the analysis, elastoplastic soil constitutive models were employed—MO Granular for the thawed layer and Cam-Clay for the frozen layer—and the presence of a cement–sand grout (CSG) was explicitly accounted for, both as internal pile filling and as an external 50-mm-thick sheath around the pile. The simulation results were compared with field test data from 18 instrumented piles and with a previously developed numerical model implemented in MIDAS GTS NX. Under a vertical load of 98.1 kN, the computed settlement was 4.67 mm, with a maximum von Mises stress of 22.24 MPa. Under combined loading (vertical force = 118.0 kN, lateral force = 34.0 kN, bending moment = 28.3 kN·m), settlement increased to 16.5 mm, and peak stresses rose to 23.5 MPa, localized at the “pile–CSG–air” interface zone. All stress values remain well below the yield strength of 09G2S steel (345 MPa), confirming the structural adequacy of the pile design. The study demonstrates that the use of physically grounded soil models (MO Granular and Cam-Clay) in ANSYS provides a more accurate representation of the stress–strain behavior compared to the simplified Mohr–Coulomb model used in the earlier MIDAS GTS NX simulation. However, calibration against field data is essential to account for real-world material heterogeneities, construction imperfections, and localized defects. These findings contribute to improving the quality, reliability, and safety of pile foundation design on permafrost, particularly in support of strategic infrastructure projects in the Russian Arctic.

Keywords: permafrost, steel piles, MIDAS GTS NX, numerical modeling, arctic development, stress–strain state, vertical and lateral loads, finite element method.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-6-166-175

EDN: UOYHQH

*This study was supported by the Priority 2030 State Program (Grant No. 075-15-2025-210 dated 04.04.2025) under the project “Enhancing the Quality and Reliability of Foundations on Permafrost through Computer Simulation of Drilled-and-Grouted Pile Stability” (Project Code: KNTN-1-9).**

Ivan Karpov. E-mail: karpov_id@spbstu.ru

Yuri Klochkov, Doctor of Engineering Sciences. E-mail: general@tyuiu.ru

Boris Ermakov, Doctor of Engineering Sciences. E-mail: ermakov55@bk.ru

Sergey Ermakov, Candidate of Engineering Sciences. E-mail: ermakovsb@tyuiu.ru

Aleksey Alkhimenko, Candidate of Engineering Sciences. E-mail: a.alkhimenko@spbstu.ru