

УДК 624.15:624.139:625.1

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ОСНОВАНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТАХ С УШИРЕНИЯМИ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

В. С. Федоров

Е. Е. Купчиков

*Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)*

*Российский университет транспорта (РУТ МИИТ)*

**Аннотация.** Объектом исследования в статье является тепловой режим многолетнемерзлых грунтов в основании здания на свайных фундаментах глубокого заложения с уширениями. Актуальность обусловлена необходимостью повышения несущей способности и долговечности фундаментов в криолитозоне при климатических изменениях; применение уширений позволяет в 2–2,5 раза увеличить несущую способность свай по сравнению с цилиндрическими аналогами. В результате численного моделирования нестационарного температурного поля в программном комплексе Frost.Термо, с учетом работы свайно-ростверковой системы с уширениями, получены пространственно-временные распределения температуры грунтов, оценены силы смерзания и несущая способность свай с уширениями. Установлен эффект уширения как естественного анкера, обеспечивающего дополнительное сопротивление выдергиванию при морозном пучении; несущая способность свай с уширениями к 2039 г. снижается на 19,3% по сравнению с начальной: с 3551 кН до 2865 кН. Уширения в сваях глубокого заложения являются эффективным конструктивным решением для строительства в многолетнемерзлых грунтах; результаты численного моделирования позволяют прогнозировать изменение несущей способности фундаментов во времени и обосновывать необходимость термостабилизации грунтов.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые грунты, свайные фундаменты с уширениями, глубокое заложение, численное моделирование, Frost.Термо, несущая способность, морозное пучение, криолитозона.

UDC 624.15:624.139:625.1

# NUMERICAL MODELLING OF THE THERMAL REGIME OF TRANSPORT STRUCTURE FOUNDATIONS ON DEEP PILE FOUNDATIONS WITH ENLARGED BASES IN PERMAFROST CONDITIONS

V. S. Fedorov

E. E. Kupchikov

*Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAACS)*

*Russian University of Transport (RUT MIIT)*

**Abstract.** The subject of the study is the thermal regime of permafrost soils at the base of a building on deep pile foundations with enlarged bases. The relevance of the study is driven by the need to improve the bearing capacity and durability of foundations in the cryolithic zone under climate change conditions; the use of enlarged bases allows the bearing capacity of piles to be increased by a factor of 2–2.5 compared to cylindrical counterparts. As a result of numerical modelling of a non-stationary temperature field in the Frost.

Termo software package, taking into account the performance of the pile-grillage system with enlarged bases, spatial and temporal distributions of soil temperatures were obtained, and the frost bond forces and bearing capacity of piles with enlarged bases were assessed. The effect of the enlarged base acting as a natural anchor providing additional pull-out resistance under frost heave was established; the bearing capacity of piles with enlarged bases decreases by 19.3% by 2039 compared to the initial value: from 3,551 kN to 2,865 kN. Enlarged bases in deep piles are an effective structural solution for construction in permafrost; the results of numerical modelling allow forecasting changes in foundation bearing capacity over time and substantiating the need for soil thermal stabilisation.

**Keywords:** permafrost; pile foundations with enlarged bases; deep embedment; numerical modelling; Frost. Termo; bearing capacity; frost heave; cryolithic zone.

## Введение

В настоящее время развитие транспортной инфраструктуры Арктической зоны является одним из приоритетных направлений государственной политики России. По поручению Президента РФ разрабатывается комплексный проект «Арктика и Трансарктический транспортный коридор», который призван стать логистическим каркасом для всех арктических инвестиционных проектов. Реализация таких стратегических инициатив, как развитие Северного морского пути, строительство Северного широтного хода и создание круглогодичных автодорог, требует обеспечения надежности и долговечности объектов транспортной инфраструктуры. В данных условиях особую значимость приобретают научно-исследовательские работы по созданию эффективных конструктивно-технологических решений для зданий и сооружений в криолитозоне. Основной проблемой при этом остаются сложные инженерно-геологические и климатические условия, которые напрямую влияют на устойчивость оснований. Именно поэтому разработка и совершенствование конструкций фундаментов, способных противостоять деградации многолетнемерзлых грунтов, являются ключевой задачей для обеспечения безопасной и бесперебойной эксплуатации транспортных магистралей в Арктической зоне. В этих условиях все более востребованными становятся свайные фундаменты с уширениями, которые позволяют значительно повысить несущую способность и устойчивость конструкции за счет эффекта «якорения» в грунтовом массиве. Уширение в нижней части сваи или на стволе увеличивает опорную площадь основания и создает дополнительное сопротивление выдергивающим силам, что особенно важно на пучинистых грунтах с высоким содержанием льда [1–3].

В зарубежной практике значительный вклад в развитие этого направления внесли Sego, Biggar и Wong (2003). Впервые было систематически изучено применение свай с уширенным основанием в льдистых и сильнольдистых

многолетнемерзлых грунтах. Авторы провели серию натурных испытаний свай с различными диаметрами уширения, разработали методику расчета несущей способности по сопротивлению под нижним концом и силам сдвига по боковой поверхности. Экспериментально подтверждено, что уширение основания сваи в 2–2,5 раза увеличивает ее общую несущую способность по сравнению с цилиндрической свай той же длины. Кроме того, в работе детально описаны технологии формирования уширения, включая струйную и механическую, что имеет важное значение для практического внедрения в суровых климатических условиях Арктики. Данное исследование заложило основу для последующего развития конструкций свай с переменным сечением в криолитозоне [4].

Среди российских разработок особого внимания заслуживает технология буронабивных малозаглубленных свай с нижним уширением, предложенная Местниковым А. Е. и Григорьевым Д. А. для малоэтажного каменного строительства в Центральной Якутии. В отличие от традиционных буроопускных или винтовых свай, требующих тяжелой техники, предложенная конструкция выполняется с использованием ручного бура ТИСЭ-Ф и мотобура. Ключевым элементом является теплоизоляционный экран из экструдированного пенополистирола под зданием, который уменьшает мощность слоя сезонного оттаивания и стабилизирует верхнюю поверхность вечномёрзлого грунта ниже подошвы фундаментов. Натурные наблюдения за температурным режимом грунтов на строительной площадке в г. Якутске подтвердили эффективность теплоизоляции. Авторы приводят технико-экономическое сравнение, показывающее, что стоимость устройства 20 таких свай почти в 1,5–2,5 раза ниже, чем стоимость винтовых или железобетонных аналогов, что делает технологию доступной для индивидуальных застройщиков в криолитозоне [5].

Наряду с уширениями перспективным направлением является использование свай с наклонными гранями. В работе Третьяковой О. В. [6] предложен расчетный аппарат для определения геометрических параметров призматических свай с наклонными гранями — четырех-, шести- и восьмигранных, работающих в условиях сезонного морозного пучения грунтов. Автор распространила метод равновесия сил, ранее разработанный для цилиндрических свай с обратным конусом, на призматические сваи, у которых верхняя часть выполнена в виде усеченной пирамиды. Получены квадратные уравнения относительно синуса угла наклона грани, позволяющие рассчитать такой угол, при котором касательные силы морозного пучения уравниваются удерживающими силами, возникающими на наклонных поверхностях. Сравнительный анализ показал, что квадратная свая с наклонными гранями обладает наименьшей материалоемкостью среди рассмотренных типов.

Особый интерес представляет концепция создания мерзлого грунтового ядра вокруг свай с помощью сезонно действующих охлаждающих устройств (СОУ). В диссертационной работе Жайсамбаева Е. А. [7, 8] предложена и экспериментально обоснована концепция повышения несущей способности одиночной железобетонной сваи в оттаявших ММГ за счет искусственного формирования вокруг нее мерзлого ядра с помощью вертикальных СОУ. Автором проведены лабораторные и натурные эксперименты, а также численное моделирование в программном комплексе Frost 3D, которые показали, что при термостабилизации вокруг свай формируется зона мерзлого грунта, работающая как естественное уширение. Установлено, что применение одного СОУ увеличивает предельно длительное

## Методы

Численное моделирование проводилось в программном продукте Frost.Термо, реализующем метод конечных элементов для решения нестационарной задачи теплопроводности с учетом фазовых переходов «вода—лед» в порах грунта и верифицированном для задач теплопереноса в криолитозоне. Геометрия моделируемой области — 2D-сечение с последующей экструзией в 3D. Инженерно-геологическое строение представлено четырьмя слоями: ИГЭ 1 — торф, ИГЭ 2–4 — пески различной плотности. Теплофизические свойства грунтов (объемная теплоемкость талого и мерзлого грунта, теплопроводность, суммарная весовая влажность, плотность сухого грунта, температура фазового перехода) заданы согласно табл. 1.

сопротивление свай на 50–54%, а двух СОУ — на 80–86%. Разработана аналитическая методика определения осадки свай с учетом геометрических параметров мерзлого ядра (диаметр, высота, положение относительно пяты). Данный подход позволяет эффективно использовать свайные фундаменты в условиях пониженного залегания кровли ММГ, где традиционное опирание на мерзлый слой невозможно.

Таким образом, анализ отечественного и зарубежного опыта показывает, что сваи с уширениями, в том числе формируемыми термостабилизацией, являются эффективным средством повышения надежности фундаментов в криолитозоне [9–11]. Вместе с тем остается недостаточно изученным вопрос долговременного изменения несущей способности таких свай под влиянием глобального потепления и деградации мерзлоты. Настоящая работа посвящена численному моделированию теплового режима оснований зданий на свайных фундаментах глубокого заложения с уширениями в условиях многолетнемерзлых грунтов на примере Арктической зоны.

Целью настоящей работы является количественная оценка изменения несущей способности свайных фундаментов глубокого заложения с уширениями во времени под влиянием деградации многолетнемерзлых грунтов, вызванной глобальным потеплением климата, на основе численного моделирования нестационарного температурного поля в программном комплексе Frost. Термо, а также обоснование эффективности применения уширений для повышения надежности и долговечности оснований объектов транспортной инфраструктуры в Арктической зоне: опор мостов, путепроводов, эстакад, железнодорожных путей.

Климатические граничные условия заданы с учетом повышенного снегонакопления. На боковых и нижней гранях расчетной области задан тепловой поток, соответствующий геотермическому градиенту. Внутри области смоделировано свайное поле из забивных железобетонных свай с уширениями. Расчетная сетка — адаптивная, с локальным сгущением вблизи свай и поверхности грунта. Временной интервал расчета — 15 лет (2024–2039 гг.) с шагом 1 месяц. Несущая способность свай определялась по силам смерзания на боковой поверхности и сопротивлению грунта под острием с учетом увеличенной площади опоры за счет уширения.

Таблица 1

Теплофизические свойства грунтов

| № п/п | ИГЭ | Наименование грунта | Объемная теплоемкость талого, Дж/(м³·К) | Объемная теплоемкость мерзлого, Дж/(м³·К) | Теплопроводность талого, Вт/(м·К) | Теплопроводность мерзлого, Вт/(м·К) | Влажность, д. е. | Плотность сухого, кг/м³ |
|-------|-----|---------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------|-------------------------|
| 1     | 1   | Торф                | $2,94 \cdot 10^6$                       | $1,85 \cdot 10^6$                         | 0,51                              | 0,86                                | 5,53             | 150                     |
| 2     | 2   | Песок               | $2,99 \cdot 10^6$                       | $2,17 \cdot 10^6$                         | 1,41                              | 1,55                                | 0,28             | 1380                    |
| 3     | 3   | Песок               | $3,13 \cdot 10^6$                       | $2,14 \cdot 10^6$                         | 1,57                              | 1,79                                | 0,38             | 1220                    |
| 4     | 4   | Песок               | $3,16 \cdot 10^6$                       | $2,05 \cdot 10^6$                         | 1,25                              | 2,30                                | 0,44             | 1000                    |

## Результаты

1. Несущая способность свай снизилась с 3551 кН в 2024 г. до 2865 кН в 2039 г., что составляет уменьшение на 19,3% за 15 лет. График зависимости несущей способности от времени показывает нелинейный спад с 3800 кН до 1300 кН при экстраполяции на более длительный период (рис. 1).

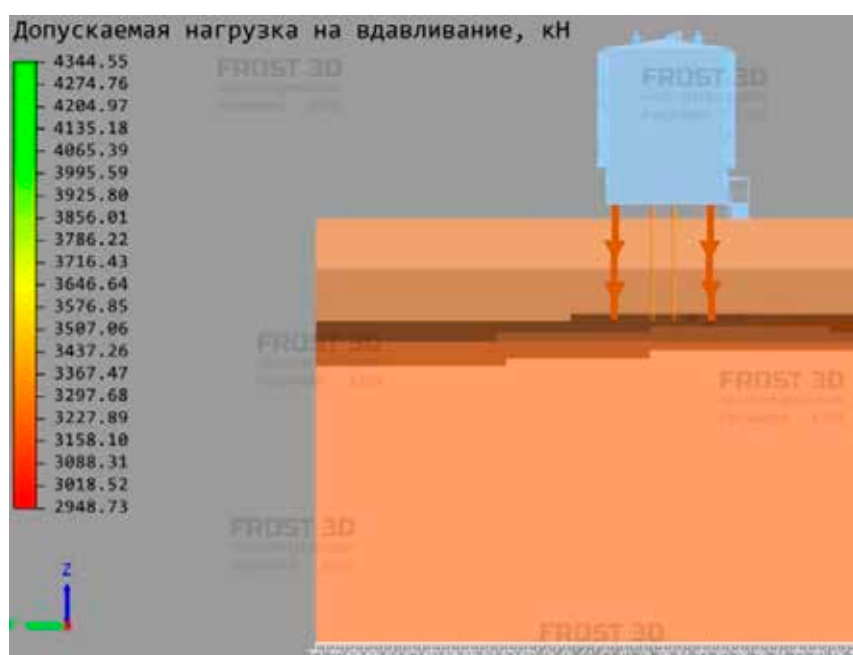


Рис. 1. Несущая способность свай с уширениями на стволе на 2024 г. кН = 3551. Источник: авторы исследования

2. Доля незамерзающей воды: максимальное значение снизилось с 71% до 69%, что свидетельствует о постепенном оттаивании грунта и уменьшении количества льда в порах (рис. 2).

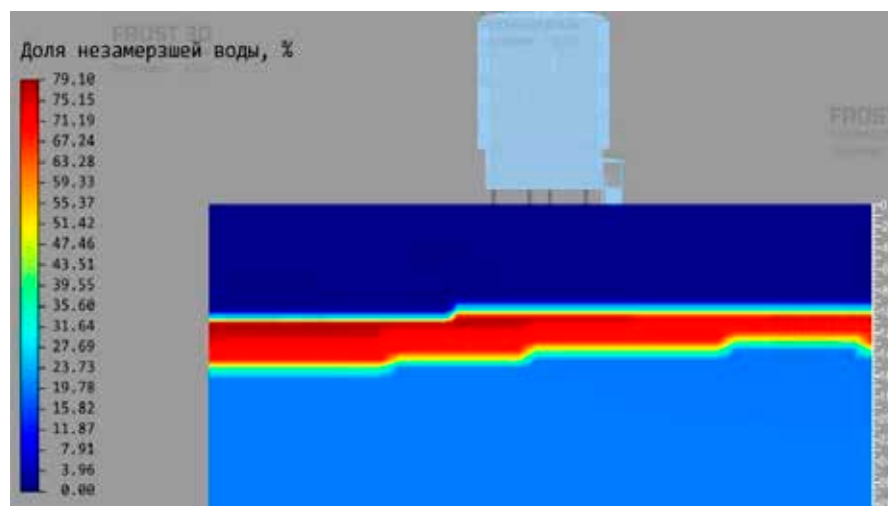


Рис. 2. Доля незамерзающей воды на 2024 г.  $W_{max} = 71\%$ . Источник: авторы исследования

3. Допустимая нагрузка на вдавливание уменьшилась с 3158 кН в 2024 г. до 2412 кН в 2039 г., что соответствует снижению на 23,6%.
4. Температура вечной мерзлоты повысилась: максимальная температура в массиве поднялась с  $-4^{\circ}\text{C}$  до  $-3^{\circ}\text{C}$ , минимальная под-

нялась с  $-2^{\circ}\text{C}$  до  $-1^{\circ}\text{C}$ , что подтверждает общую тенденцию деградации мерзлоты в условиях изменения климата и напрямую влияет на долговечность фундаментов с уширениями (рис. 3).

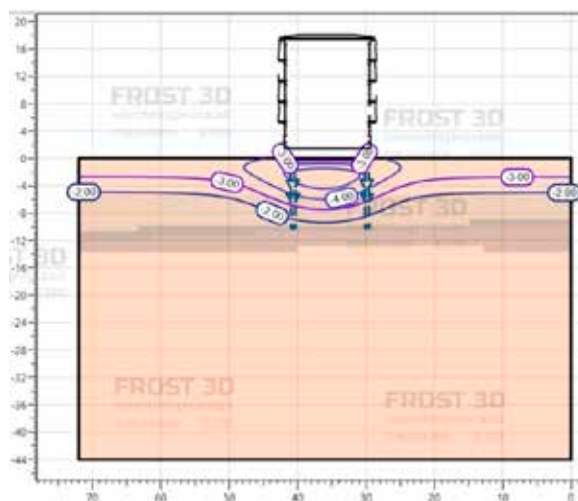


Рис. 3. Допустимая нагрузка на вдавливание на 2024 г. кН = 3158. Источник: авторы исследования

Установлено, что уширение продолжает выполнять функцию естественного анкера даже при повышении температуры грунтов, обеспечивая дополнительное сопротивление выдергиванию при сезонном пучении. Сопоставление с данными Жайсамбаева Е. А. показывает, что формирование мерзлого ядра вокруг сваи дает аналогичный эффект увеличения несущей способности до 80–86% при двух СОУ, что согласуется с полученными в нашей работе значениями [14, 15].

Дополнительно в программном комплексе MIDAS GTS NX выполнен сравнительный анализ теплообмена в грунтовом массиве для двух типов фундаментов: свай с концевыми цилиндрическими уширениями и традиционных призматических свай. На рисунках 4 и 5 представлены изополя распределения температуры в системе «свая — грунт» после трех лет термоциклиро-

вания. Установлено, что призматические сваи характеризуются более интенсивным распространением тепла по стволу, что связано с отсутствием прерывистости теплового потока на уширениях. Вследствие этого мощность сезонно-талого слоя вокруг призматических свай возрастает в среднем на 18–22% по сравнению со сваями, имеющими уширения. Сваи с уширениями, напротив, создают локальные термобарьеры: уширение частично экранирует тепловой поток, замедляя прогрев нижележащих слоев грунта. Таким образом, применение уширений не только повышает несущую способность за счет якорения, но и способствует сохранению отрицательных температур в основании, что особенно важно для долговременной устойчивости транспортных сооружений в криолитозоне [13].

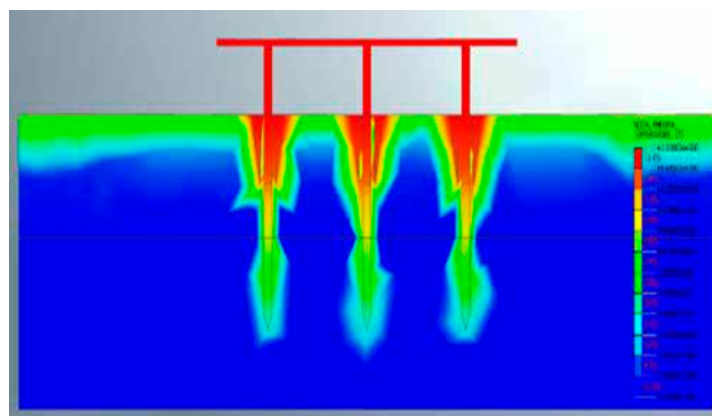


Рис. 4. Распределение температуры в грунтовом массиве вокруг сваи с концевыми цилиндрическими уширениями. Источник: авторы исследования



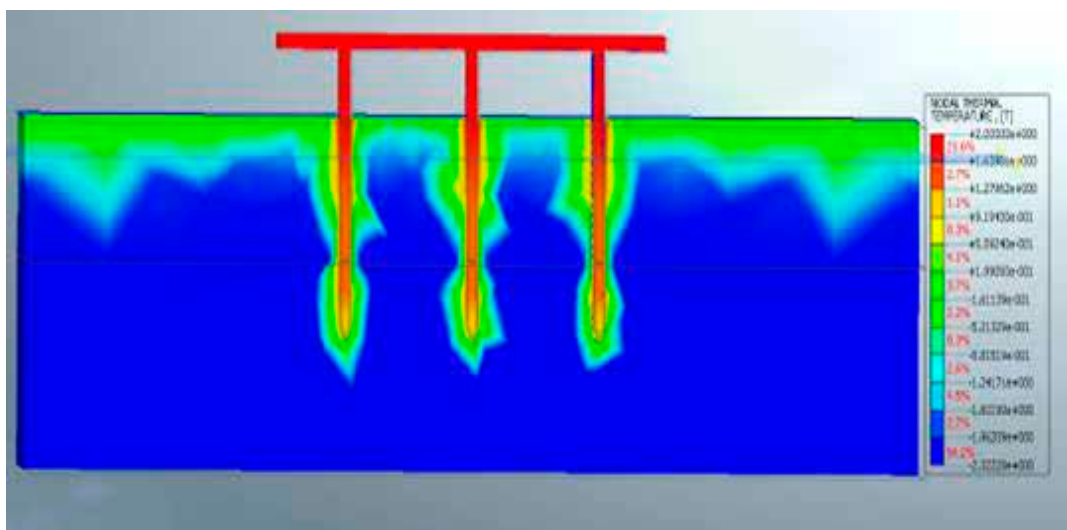


Рис. 5. Распределение температуры в грунтовом массиве вокруг призматической сваи. Источник: авторы исследования

Таблица 2

Сравнение несущей способности свай с уширениями во времени

| № п/п | Показатель                             | 2024 г. | 2039 г. | Изменение |
|-------|----------------------------------------|---------|---------|-----------|
| 1     | Несущая способность, кН                | 3551    | 2865    | –19,3%    |
| 2     | Допустимая нагрузка на вдавливание, кН | 3158    | 2412    | –23,6%    |
| 3     | Доля незамерзающей воды, %             | 71      | 69      | –2 п. п.  |
| 4     | Максимальная температура грунта, °С    | –4      | –3      | +1 °С     |

Научная новизна работы заключается в следующем:

Впервые для условий Арктической зоны, на примере климатических данных г. Лабытнанги, ЯНАО, выполнено комплексное численное моделирование теплового режима оснований зданий и транспортных сооружений на свайных фундаментах глубокого заложения с уширениями с учетом 15-летнего прогнозного периода (2024–2039 гг.) и современных трендов повышения приповерхностной температуры воздуха.

Установлены количественные закономерности снижения несущей способности свай с уширениями во времени: за 15 лет эксплуатации несущая способность уменьшается на 19,3%—с 3551 кН до 2865 кН, допустимая нагрузка на вдавливание—на 23,6%—с 3158 кН до 2412 кН, доля незамерзающей воды—с 71% до 69%, а максимальная температура грунта повышается с –4 °С

до –3 °С. Получены зависимости, позволяющие прогнозировать долговременную надежность фундаментов в условиях деградации мерзлоты.

Доказано, что уширение свай, в том числе формируемое термостабилизацией, продолжает выполнять функцию естественного анкера даже при повышении температуры грунтов, обеспечивая дополнительное сопротивление выдергиванию при морозном пучении и замедляя темп потери несущей способности по сравнению с цилиндрическими сваями.

Предложен подход к оценке изменения теплового состояния основания, который может быть использован при проектировании и реконструкции фундаментов транспортных сооружений в криолитозоне, а также для обоснования мероприятий по усилению термостабилизацией и теплоизоляции с учетом климатических изменений.

## Заключение

1. На основе анализа отечественного и зарубежного опыта (Sego, Biggar, Wong, 2003; Местников, Григорьев, 2015; Третьякова, 2023; Жайсамбаев, 2026) установлено, что свайные фундаменты с уширениями, включая формируемые термостабилизацией мерзлые ядра, являются эффективным конструктивным решением для строительства в много-

летнемерзлых грунтах, обеспечивающим повышение несущей способности в 2–2,5 раза по сравнению с цилиндрическими аналогами.

2. Численное моделирование теплового режима оснований на сваях с уширениями в программе Frost.Термо показало, что в период 2024–2039 гг. несущая способность свай снижается на 19,3%—с 3551 кН до 2865

- кН, допустимая нагрузка на вдавливание уменьшается на 23,6% — с 3158 кН до 2412 кН, а доля незамерзающей воды в массиве — с 71% до 69%. Полученные количественные характеристики могут служить основой для прогнозирования долговременной надежности фундаментов и принятия решений о необходимости усиления или термостабилизации.
3. Результаты работы могут быть использованы при проектировании, реконструкции и усилении фундаментов транспортных сооружений, опор мостов, путепроводов, эстакад и гра-

жданских объектов в криолитозоне [16–18]. Исследования выполнены в рамках плана фундаментальных научных исследований Российской академии архитектуры и строительных наук и Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на 2026 год, научно-исследовательской работы на тему № 3.1.1.15 «Развитие методологии конструирования и расчета свайно-плитных фундаментов из свай с уширениями на статические и динамические нагрузки для строительства в Арктической зоне».

## Список литературы

1. Федоров В. С., Купчикова Н. В. Особенности численного моделирования и анализа фундаментов из свай с одно- и многоместными уширениями на статические и динамические воздействия // Теория и практика фундаментостроения: сборник тезисов докладов XV Международного симпозиума по реологии грунтов, посвященного 95-летию КГАСУ и 60-летию кафедры «Основания, фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология», Казань, 04–06 июня 2025 года. — Казань: Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. — С. 18.
2. Конструктивно-технологическая эффективность фундаментов из свай с многоместными уширениями в мерзлых грунтах / В. С. Федоров, Н. В. Купчикова, В. А. Перепечин, Е. Е. Купчиков // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования: материалы VIII Национальной научно-практической конференции с международным участием, приуроченной ко Дню российской науки, Астрахань, 10 февраля 2025 года. — Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. — С. 42–47.
3. Купчикова Н. В., Никулина П. Д. Технико-экономическая эффективность устройства фундаментов из свай с одно- и многоместными уширениями для строительства в Арктической зоне // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. — 2025. — № 1(51). — С. 61–66. — DOI 10.52684/2312–3702–2025–51–1–61–66.
4. Sego D. C., Biggar K. W., Wong G. Enlarged Base (Belled) Piles for Use in Ice or Ice-Rich Permafrost // Journal of Cold Regions Engineering. — 2003. — Vol. 17, No. 2. — P. 68–88.
5. Местников А. Е., Григорьев Д. А. Буронабивные малозаглубленные сваи для малоэтажного строительства в условиях Якутии // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 11–3. — С. 491–495.
6. Tretiakova O. V. Prismatic face slope piles operating under frost heaving // Magazine of Civil Engineering. — 2023. — Vol. 120, No. 4. — Article no. 12006. — DOI 10.34910/MCE.120.6.
7. Жайсамбаев Е. А. Взаимодействие одиночной железобетонной сваи с термостабилизируемым основанием, представленным оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами: дис. ... канд. техн. наук: 2.1.2 / Жайсамбаев Еркен Аскерович. — Тюмень, 2026. — 142 с.
8. Одиночная свая в термостабилизируемом грунтовом основании на площадках с заглубленным положением кровли многолетнемерзлых грунтов / Е. А. Жайсамбаев, А. Н. Краев, А. И. Синицкий, А. Н. Громадский // Теория и практика фундаментостроения: сборник тезисов докладов XV Международного симпозиума по реологии грунтов, посвященного 95-летию КГАСУ и 60-летию кафедры «Основания, фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология», Казань, 04–06 июня 2025 года. — Казань: Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. — С. 66–67.
9. Купчикова Н. В., Баталов М. А. Цифровизация в реализации инвестиционно-строительного проекта крытого горнолыжного комплекса «Ледяное сердце» // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. — 2024. — № 1(47). — С. 32–37.
10. Купчикова Н. В. Свайные фундаменты с уширениями при землетрясениях в транспортном строительстве // Московский транспорт. Наука и проектирование. — 2025. — № 4(4). — С. 48–58.
11. Терехов И. А., Ямалов А. В. Учет взаимного влияния дефектов на категорию технического состояния конструкций // Московский

транспорт. Наука и проектирование. — 2025. — № 3(3). — С. 47–55.

12. Дьяков М. И., Барыкин Б. Ю., Дьяков И. М. Экспериментальные данные быстрых догрузений стальных жестких фундаментов в транспортном строительстве // Московский транспорт. Наука и проектирование. — 2025. — № 2(2). — С. 51–59.

13. Купчикова Н. В. Численное моделирование насыпей транспортных сооружений с учетом слабого подстилающего слоя // Московский транспорт. Наука и проектирование. — 2025. — № 1(1). — С. 43–54.

14. Жайсамбаев Е. А., Мальцева Т. В., Краев А. Н. Расчет температурного режима термостабилизируемого основания с одиночной сваей // Construction and Geotechnics. — 2023. — Т. 14. — № 4. — С. 5–18. — DOI 10.15593/2224-9826/2023.4.01.

15. Экспериментальный стенд для исследования процессов промерзания-оттаивания грунтов основания в лабораторных условиях / Е. А. Жайсамбаев, А. Н. Краев, А. Н. Краев, В. В. Воронцов // Транспортные сооружения. — 2020. — Т. 7. — № 1. — С. 13. — DOI 10.15862/16SATS120.

16. Бакенов Х. З., Кудрявцев С. А., Артюшенко А. П. К расчету осадок зданий с учетом ползу-

чести и разрушения грунтов основания, сложенных дислоцированными протерозойскими (кембрийскими) глинами // Труды 2-й международной научно-практической конференции по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению, Москва, 17–20 марта 2026 года. — Москва: Акционерное общество «Научно-исследовательский центр “Строительство”», 2026. — С. 308–313.

17. Сахаров И. И., Кудрявцев С. А., Пармонов В. Н. О расчетах свайных фундаментов в криолитозоне при использовании термостабилизаторов // Academia. Архитектура и строительство. — 2024. — № 4. — С. 134–140. — DOI 10.22337/2077-9038-2024-4-134-140.

18. Кудрявцев С. А., Сахаров И. И., Пармонов В. Н. Геотехнические проблемы строительства и эксплуатации зданий и сооружений на деградирующих многолетнемерзлых грунтах зданий и сооружений Дальнего Востока и прибрежной инфраструктуры Арктики // Труды 2-й международной научно-практической конференции по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению, Москва, 17–20 марта 2026 года. — Москва: Акционерное общество «Научно-исследовательский центр “Строительство”», 2026. — С. 622–626.

## References

1. Fedorov V. S., Kupchikova N. V. Osobennosti chislennogo modelirovaniya i analiza fundamentov iz svaj s odno- i mnogodestnyimi ushirennyami... [Features of numerical modelling and analysis of pile foundations with single and multiple enlarged bases under static and dynamic loads] // In: Teoriya i praktika fundamentostroeniya... — Kazan: Kazanskij gosudarstvennyj arkhitekturno-stroitelnyj universitet Publ., 2025. — P. 18. — (In Russ.)

2. Fedorov V. S., Kupchikova N. V., Perepechin V. A., Kupchikov E. E. Konstruktivno-tekhnologicheskaya effektivnost... [Structural and technological efficiency...] // In: Innovatsionnoe razvitie regionov... — Astrakhan: Astrakhanskij gosudarstvennyj arkhitekturno-stroitelnyj universitet Publ., 2025. — P. 42–47. — (In Russ.)

3. Kupchikova N. V., Nikulina P. D. Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost... [Technical and economic efficiency...] // Inzhenerno-stroitelnyj vestnik Prikaspiya. — 2025. — No. 1 (51). — P. 61–66. — DOI: 10.52684/2312-3702-2025-51-1-61-66. — (In Russ.)

4. Sego D. C., Biggar K. W., Wong G. Enlarged base (belled) piles for use in ice or ice-rich permafrost

// Journal of Cold Regions Engineering. — 2003. — Vol. 17. — No. 2. — P. 68–88.

5. Mestnikov A. E., Grigorev D. A. Buronabivnye malozaglublennye svai... [Bored shallow piles...] // Fundamentalnye issledovaniya. — 2015. — No. 11–3. — P. 491–495. — (In Russ.)

6. Tretyakova O. V. Prismatic face slope piles operating under frost heaving // Magazine of Civil Engineering. — 2023. — Vol. 120. — No. 4. — Art. 12006. — DOI: 10.34910/MCE.120.6.

7. Zhajsambaev E. A. Vzaimodejstvie odinochnoj zhelezobetonnoj svai... [Interaction of a single reinforced concrete pile...] — Cand. Sci. (Technical Sciences) Diss. — Tyumen, 2026. — 142 p. — (In Russ.)

8. Zhajsambaev E. A., Kraev A. N., Sinit'skij A. I., Gromadskij A. N. Odinochnaya svaya v termostabiliziruyemom osnovanii... [A single pile...] // In: Teoriya i praktika fundamentostroeniya... — Kazan: KGASU Publ., 2025. — P. 66–67. — (In Russ.)

9. Kupchikova N. V., Batalov M. A. Tsifrovizatsiya v realizatsii investitsionno-stroitel'nogo proekta... [Digitalisation...] // Inzhenerno-stroitelnyj



vestnik Prikaspiya. — 2024. — No. 1 (47). — P. 32–37. — (In Russ.)

10. Kupchikova N. V. Svajnye fundamenty s ushireniami pri zemletryasenyakh... [Pile foundations with enlarged bases...] // Moskovskij transport. Nauka i proektirovanie. — 2025. — No. 4 (4). — P. 48–58. — (In Russ.)

11. Terekhov I. A., Yamalov A. V. Uchet vzaimnogo vliyaniya defektov... [Accounting for the mutual influence of defects...] // Moskovskij transport. Nauka i proektirovanie. — 2025. — No. 3 (3). — P. 47–55. — (In Russ.)

12. Dyakov M. I., Barykin B. Yu., Dyakov I. M. Eksperimentalnye dannye bystrykh nagruzhenij... [Experimental data on rapid loading...] // Moskovskij transport. Nauka i proektirovanie. — 2025. — No. 2 (2). — P. 51–59. — (In Russ.)

13. Kupchikova N. V. Chislennoe modelirovanie nasypej... [Numerical modelling of embankments...] // Moskovskij transport. Nauka i proektirovanie. — 2025. — No. 1 (1). — P. 43–54. — (In Russ.)

14. Zhajsambaev E. A., Maltseva T. V., Kraev A. N. Raschet temperaturnogo rezhima... [Calculation of temperature regime...] // Construction and Geotechnics. — 2023. — Vol. 14. — No. 4. —

P. 5–18. — DOI: 10.15593/2224–9826/2023.4.01. — (In Russ.)

15. Zhajsambaev E. A., Kraev A. N., Vorontsov V. V. Eksperimentalnyj stand... [Experimental stand...] // Transportnye sooruzheniya. — 2020. — Vol. 7. — No. 1. — P. 13. — DOI: 10.15862/16SATS120. — (In Russ.)

16. Bakenov Kh. Z., Kudryavtsev S. A., Artyushchenko A. P. K raschetu osadok zdaniy... [On calculation of settlements...] // In: Trudy 2-j mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii... — Moscow: AO “Nauchno-issledovatel'skij tsentr ‘Stroitel'stvo’” Publ., 2026. — P. 308–313. — (In Russ.)

17. Sakharov I. I., Kudryavtsev S. A., Paramonov V. N. O raschetakh svajnykh fundamentov... [On calculation of pile foundations...] // Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. — 2024. — No. 4. — P. 134–140. — DOI: 10.22337/2077–9038–2024–4–134–140. — (In Russ.)

18. Kudryavtsev S. A., Sakharov I. I., Paramonov V. N. Geotekhnicheskie problemy... [Geotechnical problems...] // In: Trudy 2-j mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii... — Moscow: AO “Nauchno-issledovatel'skij tsentr ‘Stroitel'stvo’” Publ., 2026. — P. 622–626. — (In Russ.)

| Сведения об авторах                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Information about the authors                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Федоров Виктор Сергеевич</b><br/> академик Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ МИИТ)<br/> Адрес: 127055, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9<br/> ORCID: 0000-0002-0906-716X<br/> E-mail: fvs_skzs@mail.ru</p> | <p><b>Fedorov Viktor Sergeevich</b><br/> Academician of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (RAACS); Doctor of Technical Sciences; Professor; Head of the Department of Structural Engineering, Buildings and Facilities, Russian University of Transport (RUT MIIT)<br/> Address: 9 bldg. 9 Obraztsova Street, GSP-4, Moscow, 127055, Russia<br/> ORCID: 0000-0002-0906-716X<br/> E-mail: fvs_skzs@mail.ru</p> |
| <p><b>Купчиков Евгений Евгеньевич</b><br/> строительно-технический эксперт ООО «ИРВИКОН», студент специалитета «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ МИИТ)<br/> Адрес: 127055, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9<br/> ORCID: 0009-0009-7720-5112X<br/> E-mail: kupchikov2022@gmail.com</p>                                                                                             | <p><b>Kupchikov Evgeny Evgenyevich</b><br/> Construction and Technical Expert, IRVIKON LLC; Student of the Specialist Programme “Construction of Railways, Bridges and Transport Tunnels”, Russian University of Transport (RUT MIIT)<br/> Address: 9 bldg. 9 Obraztsova Street, Moscow, 127055, Russia<br/> ORCID: 0009-0009-7720-5112X<br/> E-mail: kupchikov2022@gmail.com</p>                                                     |

Статья получена 19.05.2026 | статья опубликована 25.06.2026

Article received 19.05.2026 | Article published 25.06.2026