

17. Batyuk M., Vodnev B., Gnyrya A. Improvement of Equipment for Heating Concrete Mixture. *Industrial and Civil Construction*. 2022, vol. 436, pp. 67–73. DOI 10.1007/978-3-031-44432-6_9.
18. Lazarev A. A. The technology of winter concreting of monolithic frame structures with substantiation of heat treatment modes by solutions of the differential equation of thermal conductivity obtained by the method of group analysis. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021, no. 4 (17), pp. 115–122. DOI 10.22337/2587-9618-2021-17-4-115-122.
19. Tarakanov O. V., Akchurin T. K., Erofeeva I. V., Sanyagina Ya. A., Dushko O. V. Perspektivno primeneniya betonov novogo pokoleniya v tekhnologii zimnego betonirovaniya [Prospects for the use of new-generation concretes in winter concreting technology]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture]. 2024, no. 1 (94), pp. 81–90. DOI 10.35211/18154360_2024_1_81.
20. Tamrazyan A. G., Meshkov V. R., Gerashchenko V. S., Grishin A. S. Approksimatsiya teplofizicheskikh svoystv betona dlya resheniya nelineinoi zadachi teploprovodnosti zhelezobetonnykh konstrukttsii v usloviyakh pozhara [Approximation of the thermophysical properties of concrete for solving the nonlinear heat conduction problem in reinforced concrete structures under fire conditions]. *Vestnik MGSU* [Vestnik MGSU]. 2025, no. 20 (8), pp. 1135–1153. DOI 10.22227/1997-0935.2025.8.1135-1153.
21. Sokolov A. M., Shadrikov T. E. Increased frequency alternating current systems for the electrothermal processing of composite materials. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2020, pp. 449–453. DOI 10.1109/UralCon49858.2020.9216268.
22. Leontev S. V., Taleiko A. A. Control system of parameters of electrical curing of cast-in-situ reinforced concrete structures. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2023, no. 1 (19), pp. 85–96. DOI 10.22337/2587-9618-2023-19-1-85-96.
23. Banerjee D. K. A review of models for heat transfer in steel and concrete members during fire. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2021, no. 126, p. 126030. DOI 10.6028/jres.126.30.
24. Lebedeva I. V., Petrova T. A. Analiz sovremennikh podkhodov k otsenke nadezhnosti v stroitel'stve [Analysis of modern approaches to reliability assessment in construction]. *Vestnik NIC «Stroitel'stvo»* [Bulletin of the Research Center "Construction"]. 2023, no. 3 (38), pp. 20–36. DOI 10.37538/2224-9494-2023-3.
25. Kanareikin A. Distribution of the temperature field in the rod, taking into account the correction for heat loss through its side surface. *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 376, p. 01078. DOI 10.1051/e3sconf/202337601078.

© А. А. Николаев, С. А. Логинова

Ссылка для цитирования:

Николаев А. А., Логинова С. А. Технико-экономическая эффективность методов зимнего бетонирования в климатических условиях Ярославской области // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский гос. архит.-строит. университет. Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 3 (57). С. 50–57.

УДК 624.139:624.154.3:004.94
DOI 10.52684/2312-3702-2026-57-3-57-66

**МЕТОДИКА ПОДГОТОВКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГОТОВЫХ СВАЙ
С НЕСКОЛЬКИМИ УШИРЕНИЯМИ НА СТВОЛЕ В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

В. С. Федоров, Н. В. Купчикова, Е. Е. Купчиков

Федоров Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (МИИТ); руководитель научно-исследовательской работы № 3.1.1.15, Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-0906-716X; e-mail: fvs_skzs@mail.ru;

Купчикова Наталья Викторовна, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (МИИТ); доктор технических наук, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; исполнитель научно-исследовательской работы № 3.1.1.15, Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2986-4190; e-mail: kupchikova79@mail.ru;

Купчиков Евгений Евгеньевич, студент, Российский университет транспорта (МИИТ); исполнитель научно-исследовательской работы № 3.1.1.15, Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Российская Федерация

Развитие транспортной инфраструктуры в Арктической зоне требует применения свайных фундаментов, способных воспринимать значительные нагрузки в условиях многолетнемерзлых грунтов. Сваи с многоступенчатыми уширениями на стволе являются эффективным конструктивным решением, однако методика подготовки их экспериментальных исследований в мерзлых грунтах недостаточно проработана. Цель работы – разработать

методику подготовки экспериментальных исследований готовых свай с тремя уширениями на стволе в мерзлых грунтах на основе предварительного численного моделирования. Выполнен анализ исследований по экспериментальным методам испытаний свай в мерзлых грунтах. Проведено численное моделирование в программных комплексах Frost 3D, Frost.Termo и MIDAS GTS NX для готовых свай с тремя уширениями на стволе. Обоснованы масштабы моделирования, структура экспериментального стенда, состав контрольно-измерительного оборудования и последовательность этапов испытаний. Установлено, что при четырех уширениях несущая способность свай в 2–3 раза превышает несущую способность призматической сваи, а осадка снижается в два раза. Выявлено, что уширения создают локальные термобарьеры, замедляя прогрев нижележащих слоев грунта на 18–22 % по сравнению с призматическими сваями. Определены рациональные геометрические параметры уширений и обоснованы масштабы физического моделирования. Разработанная методика позволяет обоснованно подготовить лабораторные и натурные эксперименты с готовыми сваями с тремя уширениями на стволе в мерзлых грунтах, сократить материальные затраты и повысить достоверность результатов.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, свая с тремя уширениями на стволе, готовые сваи, численное моделирование, Frost 3D, MIDAS GTS NX, методика эксперимента, криолитозона.

METHODOLOGY FOR PREPARING EXPERIMENTAL STUDIES OF PRE-FABRICATED PILES WITH MULTIPLE SHAFT ENLARGEMENTS IN FROZEN SOILS BASED ON NUMERICAL MODELING RESULTS

V. S. Fedorov, N. V. Kupchikova, Ye. Ye. Kupchikov

Fedorov Viktor Sergeyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Structural Systems, Buildings, and Structures Department, Russian University of Transport (MIIT); Head of research project no. 3.1.1.15, Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0906-716X; e-mail: fvs_skzs@mail.ru;

Kupchikova Natalya Viktorovna, Doctor of Technical Sciences, Professor of Structural Systems, Buildings, and Structures Department, Russian University of Transport (MIIT); Doctor of Technical Sciences, Professor of Industrial and Civil Engineering Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering; executor of research work no. 3.1.1.15, Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2986-4190; e-mail: kupchikova79@mail.ru;

Kupchikov Yevgeniy Yevgenyevich, Student, Russian University of Transport (MIIT); executor of research work no. 3.1.1.15, Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russian Federation

Developing transport infrastructure in the Arctic zone requires the use of pile foundations capable of withstanding significant loads in permafrost conditions. Piles featuring multiple shaft enlargements represent an effective structural solution; however, the methodology for preparing experimental studies on such piles in frozen soils has not been sufficiently developed. The aim of this work is to develop a methodology for preparing experimental studies on precast piles with three shaft enlargements in frozen soils, based on preliminary numerical modeling. An analysis of research regarding experimental pile testing methods in frozen soils was conducted. Numerical modeling was performed using the Frost 3D, Frost.Termo, and MIDAS GTS NX software packages for precast piles with three shaft enlargements. The modeling scale, the structure of the experimental test setup, the instrumentation required, and the sequence of testing stages were substantiated. It was established that, with four enlargements, the pile's load-bearing capacity is 2–3 times higher than that of a prismatic pile, while settlement is reduced by half. It was found that the enlargements create local thermal barriers, slowing the warming of underlying soil layers by 18–22 % compared to prismatic piles. Optimal geometric parameters for the enlargements were determined, and the scale for physical modeling was substantiated. The developed methodology enables the well-founded preparation of laboratory and field experiments involving precast piles with three shaft enlargements in permafrost soils, while reducing material costs and enhancing the reliability of the results.

Keywords: permafrost, pile with three shaft enlargements, precast piles, numerical modeling, Frost 3D, MIDAS GTS NX, experimental methodology, cryolithozone.

Введение

Арктическая зона России является стратегически важным регионом, где активно развивается транспортная, промышленная и гражданская инфраструктура [1]. Строительство на многолетнемерзлых грунтах (ММГ) сопряжено с неравномерным пучением, морозобойным растрескиванием, солифлюкцией и деградацией мерзлоты под воздействием климатических изменений и техногенных нагрузок [2, 3].

Одним из перспективных направлений повышения надежности свайных фундаментов в криолитозоне является применение свай с многоместными уширениями на стволе [4, 5]. Такие сваи изготавливаются в заводских условиях в готовом виде и привозятся на площадку строительства, что обеспечивает высокое качество железобетона, сокращение сроков и трудоемкости работ. Уширения на стволе выполняют функцию естественных анкеров, увеличивая площадь взаимодействия с грунтом и создавая дополнительное сопротивление выдергиванию при морозном пучении [6].

Однако экспериментальные исследования таких конструкций в мерзлых грунтах сопряжены со значительными материальными затратами: необходимы изготовление или приобретение готовых свай, создание экспериментальной площадки, проведение длительного температурного мониторинга, статических испытаний и обработка большого объема данных. В связи с этим актуальной задачей является разработка методики подготовки экспериментальных исследований, основанной на предварительном численном моделировании теплового режима и напряженно-деформированного состояния системы «свая с уширениями – мерзлый грунт» [7, 8].

Цель исследования – разработка методики подготовки экспериментальных исследований готовых свай с несколькими уширениями на стволе в мерзлых грунтах на основе результатов численного моделирования.

Задачи исследования:

- 1) проанализировать существующий опыт экспериментальных исследований свай в мерзлых грунтах;
- 2) выполнить численное моделирование теплового режима и напряженно-деформированного состояния готовых свай с тремя уширениями на стволе;
- 3) обосновать геометрические параметры уширений и масштабы физического моделирования;
- 4) разработать структуру экспериментального стенда и состав контрольно-измерительного оборудования;
- 5) разработать последовательность этапов лабораторных и натурных экспериментов.

Материалы и методы

Анализ существующего опыта

Методологической основой работы является анализ технической и научной литературы, посвященной механике деформационных процессов в мерзлых и оттаивающих грунтах, а также особенностям экспериментальных исследований свай в криолитозоне [9, 10].

В диссертационном исследовании А. Д. Набережного [11] приведена методика испытаний моделей ребристых свай на статические вдавливающие нагрузки в подземной лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН при постоянной температуре $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ с использованием рычажных прессов и дистанционной видеофиксации деформаций. Экспериментально установлено, что несущая способность мерзлого основания по боковой поверхности зависит от шага и угла наклона ребер: наиболее эффективны ребра с шагом $1/4\text{--}5/12$ диаметра свай и углом наклона нижних граней $45\text{--}55^{\circ}$. Исследованы грунтовые растворы-заполнители скважин, установлены температуры и продолжительность замерзания растворов, сопротивление сдвигу по поверхностям

смерзания с грунтом и бетоном, а также влагоперенос при погружении свай с различной начальной температурой. Эти данные полезны для планирования наших экспериментов, поскольку показывают, что геометрия выступов на стволе свай определяет характер передачи нагрузки на мерзлый грунт.

В диссертационном исследовании Е. А. Жайсамбаева [12, 13] приведена методика лабораторных экспериментов с использованием метода расширенного подобия при геометрическом масштабе $1:10$ и временном масштабе $1:100$. Экспериментальный стенд представлял собой грунтовый лоток с внутренними размерами $1\times 1\times 1,1\text{ м}$, утепленный для моделирования одномерного промерзания. В качестве грунта основания использовался суглинок нарушенной структуры с плотностью $\rho_d = 1510\text{--}1540\text{ кг/м}^3$ и влажностью $W = 32\text{--}35\text{ \%}$. Для измерения нагрузок использовался динамометр ДИН-1, для измерения перемещений – индикаторы часового типа ИЧ-50 и ИЧ-10, для измерения температуры – термопары типа ТХК(L) с измерителем ИТ-6. Эти методические подходы приняты за основу при разработке нашей программы экспериментов.

Численное моделирование

Численное моделирование проводилось в программных комплексах Frost 3D, Frost.Termo и MIDAS GTS NX, реализующих метод конечных разностей и метод конечных элементов для решения нестационарной задачи теплопроводности с учетом фазовых переходов «вода – лед» в порах грунта [14, 15].

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 СП 25.13330.2020.

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 тремя уширениями на стволе. Расчетная сетка – адаптивная, с локальным сгущением вблизи свай и поверхности грунта. Временной интервал расчета – 15 лет 2024–2039 гг. с шагом один месяц.

Несущая способность свай определялась по силам смерзания на боковой поверхности и сопротивлению грунта под острием с учетом увеличенной площади опоры за счет уширений. Дополнительно в программном комплексе MIDAS

GTS NX выполнен сравнительный анализ теплообмена в грунтовом массиве для двух типов фундаментов: свай с тремя уширениями на стволе и традиционных призматических свай.

Для анализа напряженно-деформированного состояния была построена конечно-элементная модель фундамента с уширениями в ПК MIDAS GTS NX под многоэтажное здание с местными уширениями на стволе свай. В моделях варьировался диаметр свай от 400 до 800 мм, и длина – от 20 до 50 м. Выполнялся расчет

по определению количества и формообразования уширений на теле свай.

Результаты

Геометрические параметры уширений и несущая способность

По результатам численного моделирования установлено, что при четырех уширениях несущая способность свай в два-три раза превышает несущую способность призматической свай, а осадка снижается в два раза (рис. 1).

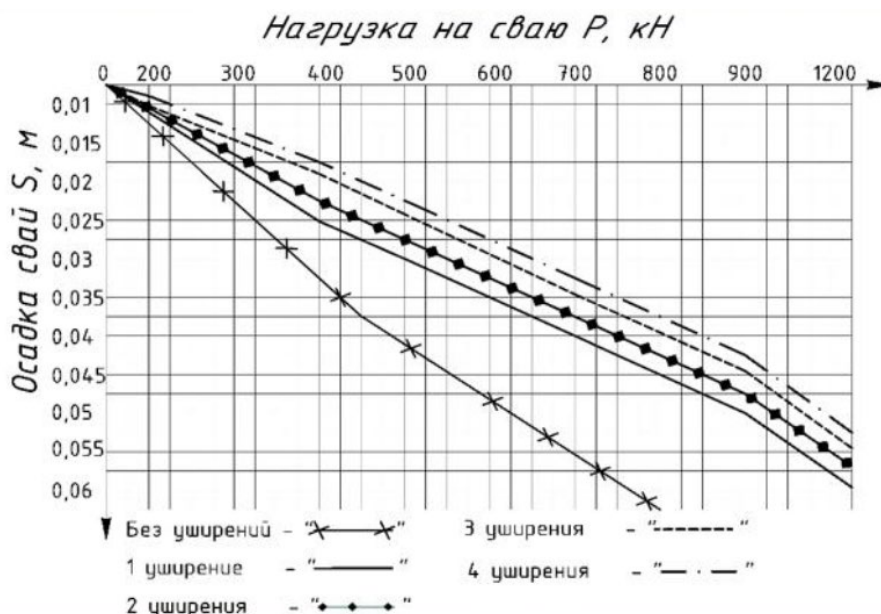


Рис. 1. Исследование НДС свай с местными уширениями и сравнительный анализ с обычной свайей: график зависимости осадки от нагрузки для свай без уширений, с 1, 2, 3 и 4 уширениями (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Study of the stress-strain state of piles with multi-seat enlargements and comparative analysis with a conventional pile: graph of settlement versus load for piles without enlargements, with 1, 2, 3, and 4 enlargements (illustration by the authors)

Данные, представленные на графике, показывают, что при нагрузке 1200 кН осадка свай без уширений составляет 0,062 м, с одним уширением – 0,0616 м, двумя – 0,062 м, тремя – 0,0639 м, четырьмя – 0,0749 м. Однако при меньших нагрузках 200–900 кН наблюдается отчетливое преимущество свай с уширениями: например, при нагрузке 700 кН осадка свай без уширений составляет 0,0365 м, с четырьмя уширениями – 0,0608 м, что объясняется перераспределением усилий между уширениями.

При поверхностном оттаивании грунта результаты показали, что исключается неравномерность осадки за счет внутреннего перераспределения усилий между уширениями по высоте свай за счет сложной их конфигурации.

Тепловой режим грунтового массива

Установлено, что свай с уширениями создают локальные термобарьеры: уширение частично экранирует тепловой поток, замедляя прогрев нижележащих слоев грунта. Призматические свай 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 (рис. 2, 3).

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.

Произведен расчет на три года с варьированием температуры, оттаивание после 30 месяцев распространяется до 16 м и далее не будет изменений. Численный анализ и моделирование теплотехнических расчетов методом конечных элементов в мерзлом грунтовом массиве показали, что распределение положительных температур после 1 месяца соответствует максимальной глубине оттаивания $d_{\max} = 5,3$ м, после 30 месяцев – $d_{\max} = 22$ м.

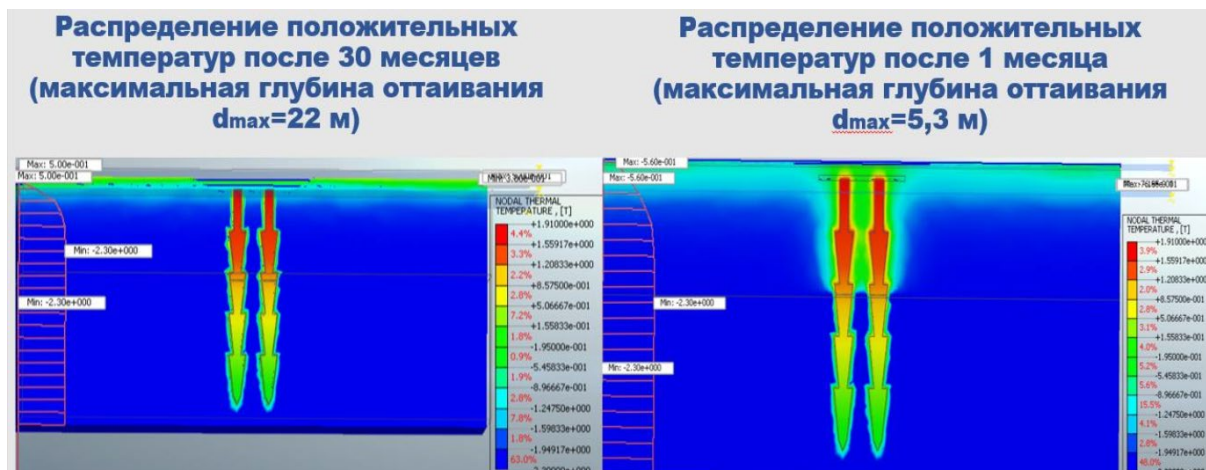


Рис. 2. Распределение температуры в грунтовом массиве вокруг сваи с концевыми цилиндрическими уширениями (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Temperature distribution in the soil mass around a pile with end cylindrical enlargements (temperature contour plots) (illustration by the authors)

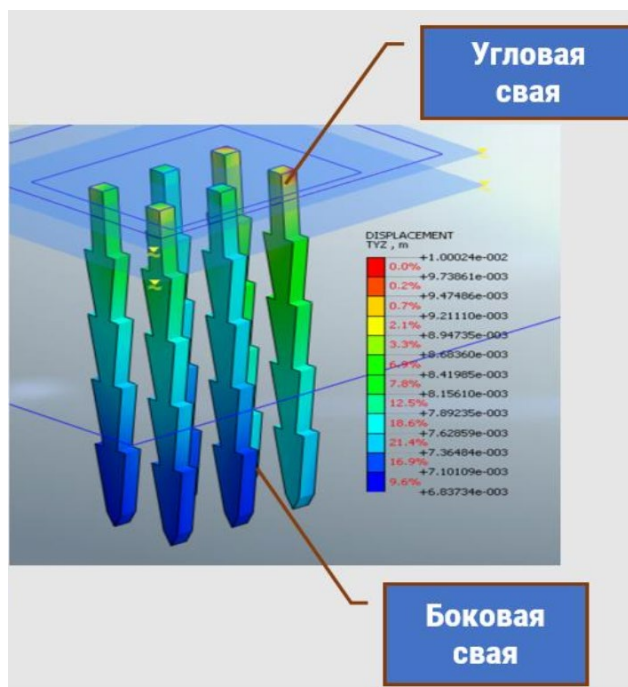


Рис. 3. Распределение температуры в грунтовом массиве вокруг призматической сваи (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Displacement contour plots in the pile group with multi-seat enlargements (illustration by the authors)

Прогноз снижения несущей способности

В результате моделирования получены следующие данные: несущая способность свай с уширениями 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 до 1300 кН при экстраполяции на более длительный период. Допустимая нагрузка на вдавливание уменьшилась с 3158 кН в 2024 г. до 2412 кН в 2039 г., падение на 23,6 %. Доля незамерзающей воды максимальное значение снизилось с 71 до 69 %, что свидетельствует о постепенном оттаивании грунта и уменьшении количества льда

в порах. Температура вечной мерзлоты повысилась: максимальная температура в массиве поднялась с -4 до -3 °C, минимальная – с -2 до -1 °C.

Обоснование масштабов моделирования

Для проведения лабораторных исследований готовых свай с тремя уширениями на стволе в мерзлых грунтах обоснованы масштабы моделирования на основе метода расширенного подобия [16].

Геометрический масштаб (Мг) принят равным 1:10, что обеспечивает: возможность размещения модели свай с тремя уширениями в экспериментальном лотке; сохранение геометрического подобия уширений; адекватное моделирование тепловых процессов в грунтовом основании.

Временной масштаб (Мв) принят равным 1:100 согласно методике, Карлова В.Д., согласно

которой геометрический масштаб равен квадрату временного масштаба. Продолжительность зимнего периода в натурных условиях составляет 5448 ч, летнего – 3312 ч. Согласно принятому масштабу времени: продолжительность холодного периода – 54,48 ч при температуре

$T_{f,m} = -13,8\text{ }^{\circ}\text{C}$; продолжительность теплого периода – 33,12 ч при температуре $T_{th,m} = +10,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Структура экспериментального стенда

Разработана структура экспериментального стенда для исследования готовых свай с тремя уширениями на стволе в мерзлых грунтах (рис. 4).

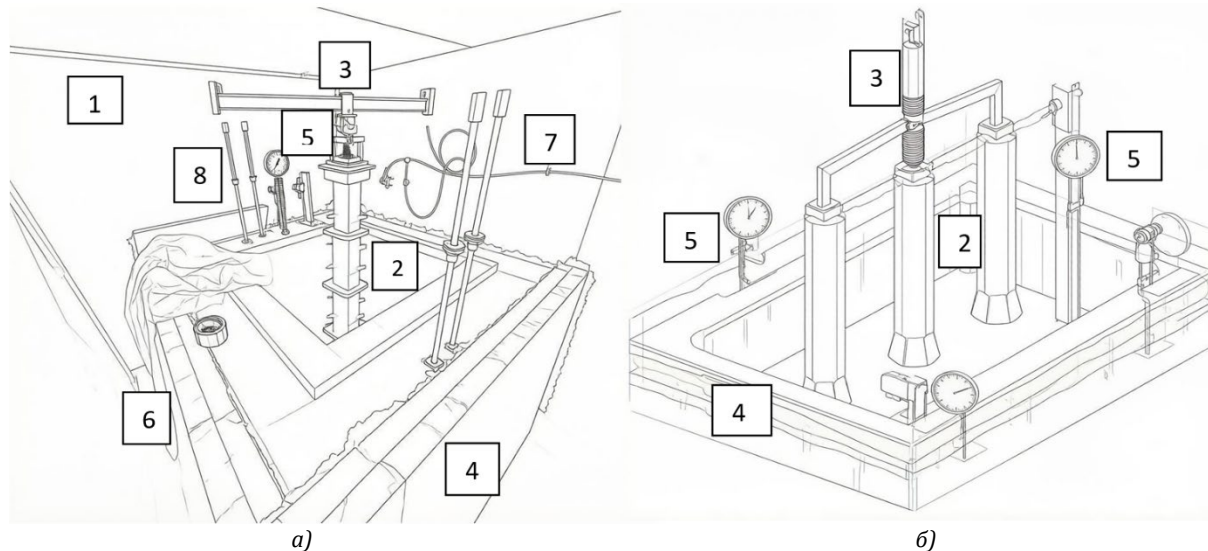


Рис. 4. Схема экспериментального стенда для одной сваи (а) и для трех свай с уширениями (б): 1 – стены морозильной комнаты - камеры; 2 – свая с тремя уширениями; 3 – домкратная система для нагружения сваи и корпус стенда; 4 – лоток с грунтом; 5 – индикаторы ИЧ-50; 6 – утепленный пол климатической камеры; 7 – система подачи воды; 8 – датчик температуры воздуха (иллюстрация авторов)
Fig. 4. Scheme of the experimental stand for one pile (a) and for three piles with enlargements (b): 1 – walls of the freezing room-chamber; 2 – pile with three enlargements; 3 – jacking system for loading the pile and the stand body; 4 – soil box; 5 – dial indicators ИЧ-50; 6 – insulated floor of the climate chamber; 7 – water supply system; 8 – air temperature sensor (illustration by the authors)

Стенд представляет собой грунтовый лоток с жесткими боковыми стенками и дном с внутренними размерами $1 \times 1 \times 1,1(h)$ м. Боковые стенки и дно лотка из фанеры обшиваются утеплителем с $\rho = 35\text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,029\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ толщиной 0,35 м для моделирования одностороннего и плоскопараллельного промерзания.

На боковые стенки и дно лотка наносится тонкий слой солидола с последующим размещением двойного слоя полиэтиленовой пленки толщиной 150 мкм для сохранения заданной влажности грунтов основания и минимизации сил трения.

Модель готовой сваи с тремя уширениями выполняется из железобетона в геометрическом масштабе 1:10 к натурным размерам: поперечное сечение ствола – $3 \times 3\text{ см}$; общая длина – 80 см; три уширения на стволе – диаметр 6–9 см; расстояние между уширениями – 15–20 см.

Контрольно-измерительное оборудование

Для проведения экспериментов предусмотрен следующий состав контрольно-измерительного оборудования: для измерения нагрузок динамометр ДИН-1 с тензорезисторным мостом и электронным блоком обработки данных; для измерения перемещений индикаторы часового типа ИЧ-50 с ценой деления 0,01 мм для измерения перемещений свай; модифицированные

индикаторы часового типа ИЧ-10 с точностью 0,1 мм для измерения перемещений слоев грунтового основания; грунтовые марки, соединенные стальной струной диаметром 0,3 мм с индикаторами; для измерения напряжений тензометрические месдозы мембранного типа диаметром 30 мм; регистрирующая аппаратура – тензостанция с программным обеспечением; для измерения температуры измеритель многоканальный ИТ-6; термоэлектрические термопары типа ТХК(L); для моделирования температурных условий холодильная сплит-система POLAIR Standard с диапазоном моделируемых температур от -20 до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Методика проведения лабораторных исследований

Лабораторные эксперименты проводятся в два этапа:

- первый – испытание талого суглинка готовой сваей с тремя уширениями статической вдавливающей нагрузкой;
- второй – испытания мерзлого суглинка готовой сваей с тремя уширениями статической вдавливающей и выдергивающей нагрузками.

Подготовительные работы: суглинок нарушенной структуры послойно по 100 мм уклады-

вается в стенд с удалением всех включений крупнее 2 мм и уплотнением статической нагрузкой 1,5 кН/м²; перед загрузкой последующего слоя поверхность предыдущего уплотненного слоя взрыхляется ножом на глубину 6–8 мм; в процессе заполнения стенда производится погружение грунтовых марок, термопар и установка мессдоз; после заполнения стенда производится вдавливание готовой сваи с тремя уширениями на глубину 70 см; моделирование температурных условий: замораживание грунта в климатической камере до температуры –3 °С.

Проведение испытаний

1. После завершения стабилизации температуры грунтового основания производится испытание сваи согласно ГОСТ 5686-2020.

2. Нагрузка передается ступенями по 500 г для лабораторной модели.

3. Каждая ступень выдерживается до стабилизации деформаций, не превышающих 0,1 мм за последние 120 мин.

4. Снятие показаний производится в последовательности: нулевой отсчет, первый отсчет сразу после приложения нагрузки, далее три последовательных отсчета с интервалом 0,5 ч, затем почасовые измерения.

Подготовительные работы: геодезическая разметка мест погружения свай; погружение готовых свай с тремя уширениями и анкерных свай; устройство термометрических скважин не далее 1 м от боковых поверхностей испытуемых свай с глубиной погружения на 2 м ниже пяты свай; погружение грунтовых марок и устройство дополнительных термометрических скважин; выдержка свай в течение 20 суток для восстановления связи грунта с поверхностями свай и стабилизации поровых давлений.

Проведение испытаний - испытания мерзлых грунтов сваями статической вдавливающей и выдергивающей нагрузкой.

Измерения: нагружение производится с помощью универсального одностороннего домкрата грузоподъемностью 100 тс; для измерения вертикальных перемещений устанавливаются два индикатора часового типа с погрешностью не более 0,1 мм; нагрузка передается ступенчато, величина ступени принимается не более 1/10 от возможной наибольшей нагрузки; критерий условной стабилизации деформации – осадка на ступени нагружения, не превышающая 0,1 мм за последние 120 мин.

Численное моделирование как инструмент подготовки эксперимента

Численное моделирование в программных комплексах Frost 3D, Frost.Termo и MIDAS GTS NX позволяет решить следующие задачи подготовки эксперимента: определение рационального количества и шага уширений для обеспечения максимальной несущей способности свай;

прогнозирование температурного режима грунтового основания с точностью до $\Delta T = 0,2$ °С для определения продолжительности этапов эксперимента; оценка напряженно-деформированного состояния системы «свая с тремя уширениями – мерзлый грунт» для выбора диапазона нагрузок при статических испытаниях; обоснование конструктивных параметров свай с уширениями для обеспечения максимальной эффективности работы в мерзлых грунтах; сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными для верификации численных моделей.

Обсуждение

Разработанная методика подготовки экспериментальных исследований готовых свай с тремя уширениями на стволе в мерзлых грунтах позволяет оптимизировать материальные и временные затраты на проведение экспериментов за счет предварительного численного моделирования [17, 18].

Основные преимущества предложенной методики:

1) снижение материальных затрат – численное моделирование позволяет определить оптимальные параметры экспериментального стенда и состав контрольно-измерительного оборудования до начала дорогостоящих натурных исследований;

2) повышение достоверности результатов – предварительное моделирование позволяет выявить критические зоны в грунтовом массиве и обосновать схему расстановки датчиков;

3) сокращение продолжительности экспериментов – определение продолжительности этапов на основе численного прогноза температурного режима позволяет избежать необоснованных задержек;

4) возможность параметрического анализа – численное моделирование позволяет исследовать влияние различных факторов (тип грунта, начальная температура, количество и шаг уширений) на несущую способность свай.

Установлено, что применение готовых свай с тремя уширениями на стволе в мерзлых грунтах позволяет: увеличить несущую способность свай в два–три раза по сравнению с призматическими сваями; снизить осадку в два раза; обеспечить дополнительное сопротивление выдергиванию при морозном пучении за счет эффекта «якорения»; замедлить темп потери несущей способности при деградации мерзлоты за счет локальных термобарьеров, создаваемых уширениями.

Полученные результаты согласуются с данными численного моделирования в программном комплексе Frost.Termo и экспериментальными данными по сваям с многоступенчатыми уширениями.

Заключение

1. Разработана методика подготовки экспериментальных исследований готовых свай

с тремя уширениями на стволе в мерзлых грунтах, основанная на результатах численного моделирования в программных комплексах Frost 3D, Frost.Termo и MIDAS GTS NX.

2. Установлено, что при четырех уширениях несущая способность свай в два-три раза превышает несущую способность призматической свай, а осадка снижается в два раза. Рациональное количество уширений для готовых свай – три, что обеспечивает оптимальное соотношение несущей способности и материалоемкости.

3. Выявлено, что уширения создают локальные термобарьеры, замедляя прогрев нижележащих слоев грунта на 18–22 % по сравнению с призматическими сваями.

4. Обоснованы масштабы моделирования для лабораторных исследований: геометрический масштаб 1:10, временной масштаб 1:100.

5. Разработана структура экспериментального стенда и определен состав контрольно-измерительного оборудования для проведения лабораторных и натурных исследований.

6. Предложенная методика позволяет снизить материальные затраты на проведение экспериментов, повысить достоверность получаемых результатов и обосновать оптимальные конструктивные параметры готовых свай с тремя уширениями для условий криолитозоны.

7. Результаты работы могут быть использованы при проектировании, строительстве и реконструкции объектов транспортной инфраструктуры в Арктической зоне.

Список литературы

1. Федоров В. С. Особенности численного моделирования и анализа фундаментов из свай с одно и многоместными уширениями на статические и динамические воздействия / В. С. Федоров, Н. В. Купчикова // Теория и практика фундаментостроения : сборник тезисов докладов XV Международного симпозиума по реологии грунтов. – Казань : КГАСУ, 2025. – С. 18.
2. Федоров В. С. 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. – Астрахань : АГАСУ, 2025. – С. 42–47.
3. Купчикова Н. В. Технично-экономическая эффективность устройства фундаментов из свай с одно- и многоместными уширениями для строительства в арктической зоне / Н. В. Купчикова, П. Д. Никулина // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2025. – № 1 (51). – С. 61–66.
4. Бекбасаров И. И. О результатах испытаний плоских моделей свай с несколькими уширениями ствола в лабораторных условиях / И. И. Бекбасаров, Е. И. Атенев, Ж. Кулболдиев // Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий : материалы II Всероссийской конференции с международным участием (г. Пермь, 26–28 мая 2021 г.). – Пермь : Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. – С. 57–74.
5. Бекбасаров И. И. Об экспериментальном оборудовании для забивки и испытаний крупномасштабных моделей свай в полевых условиях / И. И. Бекбасаров, М. Н. Байтемиров, Е. И. Атенев, Н. А. Шаншабаев // Механика и технологии. – 2019. – № 4 (66). – С. 134–141.
6. Бекбасаров И. И. Ударная погружаемость свай с уширениями ствола и их сопротивляемость вдавливающей нагрузке / И. И. Бекбасаров, М. И. Никитенко, Е. И. Атенев // Новости науки Казахстана. – 2020. – № 2 (144). – С. 124–134.
7. Sego D. C. Enlarged Base (Belled) Piles for Use in Ice or Ice-Rich Permafrost / D. C. Sego, K. W. Biggar, G. Wong // Journal of Cold Regions Engineering. – 2003. – Vol. 17, № 2. – P. 68–88.
8. Местников А. Е. Буронабивные малоуглубленные сваи для малоэтажного строительства в условиях Якутии / А. Е. Местников, Д. А. Григорьев // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11-3. – С. 491–495.
9. Федоров В. С. Численное моделирование теплового режима оснований транспортных сооружений на свайных фундаментах с уширениями в условиях многолетнемерзлых грунтов / В. С. Федоров, Е. Е. Купчиков // Московский транспорт. Наука и проектирование. – 2026. – № 2(6). – С. 57–66.
10. Купчикова Н. В. Свайные фундаменты с несколькими уширениями для слабых и структурно неустойчивых оснований. Часть 1 / Н. В. Купчикова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2023. – № 4 (46). – С. 81–86.
11. Купчикова Н. В. Упрочнение слабого подстилающего слоя грунтового основания свайно-плитного фундамента из буронабивных свай / Н. В. Купчикова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2024. – № 4 (50). – С. 77–87.
12. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. – М. : Стандартинформ, 2021. – 123 с.
13. ГОСТ 5686-2020. Грунты. Методы полевых испытаний сваями. – М. : Стандартинформ, 2020.
14. Набережный А. Д. Исследование несущей способности мерзлых грунтов основания ребристых буронабивных свай : дис. ... канд. техн. наук / А. Д. Набережный. – Якутск, 2018. – 150 с.
15. Жайсамбаев Е. А. Взаимодействие одиночной железобетонной сваи с термостабилизируемым основанием, представленным оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами : дис. ... канд. техн. наук / Е. А. Жайсамбаев. – Тюмень, 2026. – 142 с.
16. Жайсамбаев Е. А. Расчет температурного режима термостабилизируемого основания с одиночной свайей / Е. А. Жайсамбаев, Т. В. Мальцева, А. Н. Краев // Construction and Geotechnics. – 2023. – Т. 14, № 4. – С. 5–18.

17. Сахаров И. И. О расчетах свайных фундаментов в криолитозоне при использовании термостабилизаторов / И. И. Сахаров, С. А. Кудрявцев, В. Н. Парамонов // Труды 2-й Международной научно-практической конференции по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению. – М. : НИЦ «Строительство», 2026. – С. 308–313.
18. Кудрявцев С. А. Геотехнические проблемы строительства и эксплуатации зданий и сооружений на деградирующих многолетнемерзлых грунтах / С. А. Кудрявцев, И. И. Сахаров, В. Н. Парамонов // Труды 2-й Международной научно-практической конференции по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению. – М. : НИЦ «Строительство», 2026. – С. 622–626.
19. Карлов В. Д. Сезоннопромерзающие грунты как основания сооружений : дис. ... д-ра техн. наук / В. Д. Карлов. – СПб., 1998.
20. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 278 с.
21. Голли А. В. Методика измерения напряжений и деформаций в грунтах : учебное пособие / А. В. Голли. – Л. : ЛИСИ, 1984. – 53 с.

References

1. Fedorov V. S., Kupchikova N. V. Osobennosti chislennogo modelirovaniya i analiza fundamentov iz svai s odno i mnogo-mestnimi ushireniami na staticheskie i dinamicheskie vozdeistviya [Specifics of numerical modeling and analysis of pile foundations with single and multiple enlargements under static and dynamic loads]. *Teoriya i praktika fundamentostroyeniya : sbornik tezisev dokladov XV Mezhdunarodnogo simpoziuma po reologii gruntov* [Theory and Practice of Foundation Engineering : Collection of Abstracts from the XV International Symposium on Soil Rheology]. Kazan : KGASU; 2025, pp. 18.
2. Fedorov V. S., Kupchikova N. V., Perepechin V. A., Kupchikov Ye. Ye. Konstruktivno-tekhnologicheskaya effektivnost fundamentov iz svai s mnogomestnimi ushireniami v merzlykh gruntakh [Structural and technological efficiency of piles with multiple enlargements in frozen soils]. *Innovatsionnoe razvitiye regionov: potentsial nauki i sovremennogo obrazovaniya* [Innovative Regional Development: The Potential of Science and Modern Education]. Astrakhan : AGASU; 2025, pp. 42–47.
3. Kupchikova N. V., Nikulina P. D. Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost ustroystva fundamentov iz svai s odno- i mnogo-mestnimi ushireniami dlya stroitelstva v arkticheskoy zone [Techno-economic efficiency of constructing foundations using piles with single and multiple shaft enlargements for construction in the Arctic zone]. *Inzhenerno-stroitelnyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2025, no. 1 (51), pp. 61–66.
4. Bekbasarov I. I., Atenov Ye. I., Kulboldiev Zh. O rezultatakh ispitaniy ploskikh modelei svai s neskol'kimi ushireniami stvola v laboratornykh usloviyakh [On the results of laboratory tests on flat-profile pile models with multiple shaft enlargements]. *Fundamenti glubokogo zalozheniya i problemy geotekhniki territorii : materialy II Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnim uchastiem (g. Perm, 26–28 maya 2021 g.)* [Deep Foundations and Geotechnical Challenges of Territories: Proceedings of the 2nd All-Russian Conference with International Participation (Perm, May 26–28, 2021)]. Perm : Permskii natsionalnyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet; 2021, pp. 57–74.
5. Bekbasarov I. I., Baitemirov M. N., Atenov Ye. I., Shanshabaev N. A. Ob eksperimental'nom oborudovanii dlya zabivki i ispitaniy krupnomasshtabnykh modelei svai v polevykh usloviyakh [On experimental equipment for driving and testing large-scale pile models under field conditions]. *Mekhanika i tekhnologii* [Mechanics and Technologies]. 2019, no. 4 (66), pp. 134–141.
6. Bekbasarov I. I., Nikitenko M. I., Atenov Ye. I. Udarnaya pogrushchaemost svai s ushireniami stvola i ikh soprotivlyaemost vdavlivayu-shchei nagruzke [Impact drivability of piles with shaft enlargements and their resistance to compressive loads]. *Novosti nauki Kazakhstana* [News of Science of Kazakhstan]. 2020, no. 2 (144), pp. 124–134.
7. 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, pp. 68–88.
8. Mestnikov A. Ye., Grigorev D. A. Buronabivnie malozaglublennye svai dlya maloetazhnogo stroitelstva v usloviyakh Yakutii [Bored piles with shallow embedment for low-rise construction in Yakutia]. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Research]. 2015, no. 11-3, pp. 491–495.
9. Fedorov V. S., Kupchikov Ye. Ye. Chislennoe modelirovaniye teplovogo rezhima osnovanii transportnykh sooruzhenii na svainykh fundamentakh s ushireniami v usloviyakh mnogoletnemerzlykh gruntov [Numerical modeling of the thermal regime of transport structure foundations on piles with enlargements in permafrost conditions]. *Moskovskiy transport. Nauka i proektirovaniye* [Moscow Transport. Science and Design]. 2026, no. 2 (6), pp. 57–66.
10. Kupchikova N. V. Svainie fundamenty s neskol'kimi ushireniami dlya slabikh i strukturno neustoi-chivikh osnovanii. Chast 1 [Pile foundations with multiple enlargements for weak and structurally unstable subsoils. Part 1]. *Inzhenerno-stroitelnyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2023, no. 4 (46), pp. 81–86.
11. Kupchikova N. V. Uprochneniye slabogo podstilayushchego sloya gruntovogo osnovaniya svaino-plitnogo fundamenta iz buronabivnykh svai [Strengthening the weak underlying soil layer of a pile-slab foundation using bored piles]. *Inzhenerno-stroitelnyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2024, no. 4 (50), pp. 77–87.
12. SP 25.13330.2020. Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.02.04-88 [SP 25.13330.2020. Bases and foundations on permafrost soils. Updated version of SNIp 2.02.04-88]. Moscow : Standartinform; 2021, 123 p.
13. GOST 5686-2020. Grunti. Metody polevykh ispitaniy svayami [GOST 5686-2020. Soils. Field testing methods using piles]. Moscow : Standartinform; 2020.

14. Naberezhnii A. D. *Issledovanie nesushchei sposobnosti merzlykh gruntov osnovaniya rebristikh buro-opusknikh svai* [Study of the load-bearing capacity of frozen foundation soils for ribbed bored-and-lowered piles]. Yakutsk; 2018. 150 p.
15. Zhaisambaev Ye. A. *Vzaimodeistvie odinochnoi zhelezobetonnoi svai s termostabiliziruemim osnovani-em, predstavlenim ottayavshimi mnogoletnemerzlimi gruntami* [Interaction of a single reinforced concrete pile with a thermally stabilized foundation consisting of thawed permafrost soils]. Tyumen; 2026, 142 p.
16. Zhaisambaev Ye. A., Maltseva T. V., Kraev A. N. *Raschet temperaturnogo rezhima termostabiliziruemogo osnovaniya s odinochnoi svai* [Calculation of the thermal regime of a thermally stabilized foundation with a single pile]. *Construction and Geotechnics*. 2023, vol. 14, no. 4, pp. 5–18.
17. Sakharov I. I., Kudryavtsev S. A., Paramonov V. N. *O raschetakh svainikh fundamentov v kriolitozone pri ispolzovanii termostabilizato-rov* [On the analysis of pile foundations in the cryolithozone using thermal stabilizers]. *Trudi 2-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po mekhanike gruntov, geotekhnike i fundamentostroeniyu* [Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference on Soil Mechanics, Geotechnics, and Foundation Engineering]. Moscow : NITs «Stroitelstvo»; 2026, pp. 308–313.
18. Kudryavtsev S. A., Sakharov I. I., Paramonov V. N. *Geotekhnicheskie problemi stroitelstva i ekspluatatsii zdaniy i sooruzhenii na de-gradiruyushchikh mnogoletnemerzlykh gruntakh* [Geotechnical problems regarding the construction and operation of buildings and structures on degrading permafrost soils]. *Trudi 2-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po mekhanike gruntov, geotekhnike i fundamentostroeniyu* [Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference on Soil Mechanics, Geotechnics, and Foundation Engineering]. Moscow : NITs «Stroitelstvo», 2026, pp. 622–626.
19. Karlov V. D. *Sezonnopromerzayushchie grunty kak osnovaniya sooruzhenii* [Seasonally freezing soils as foundations for structures : Doctoral dissertation (Technical Sciences)]. Saint Petersburg; 1998.
20. Adler Yu. P., Markova Ye. V., Granovskii Yu. V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnikh uslovii* [Design of Experiments for Finding Optimal Conditions]. Moscow : Nauka; 1976, 278 p.
21. Golli A. V. *Metodika izmereniya napryazhenii i deformatsii v gruntakh* [Methodology for Measuring Stresses and Deformations in Soils]. Leningrad : LISI, 1984, 53 p.

© В. С. Федоров, Н. В. Купчикова, Е. Е. Купчиков

Ссылка для цитирования:

Федоров В. С., Купчикова Н. В., Купчиков Е. Е. Методика подготовки экспериментальных исследований готовых свай с несколькими уширениями на стволе в мерзлых грунтах по результатам численного моделирования // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 3 (57). С. 57–66.