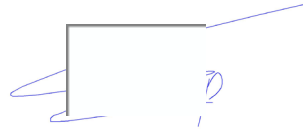


На правах рукописи



Бояринцев Андрей Владимирович

**УЧЁТ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА
КОНСТРУКЦИИ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА
НА СОВМЕСТНУЮ РАБОТУ С ГРУНТОВЫМ
ОСНОВАНИЕМ ПРИ ЕГО ПРОМЕРЗАНИИ**

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты,
подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург-2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: чл.-корр. РААСН, доктор технических наук, профессор **Мангушев Рашид Абдуллоевич**

Официальные оппоненты: **Невзоров Александр Леонидович**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Северный (арктический)
федеральный университет им. М.В. Ломоносова»,
г. Архангельск, кафедра инженерной геологии,
оснований и фундаментов, профессор;

Захаров Александр Викторович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный
университет», кафедра промышленного
и гражданского строительства, доцент;

Ведущая организация: **Акционерное общество
«Научно-исследовательский центр
«Строительство»**, г. Москва.

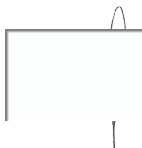
Защита состоится «02» февраля 2023 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.04 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4, зал заседаний диссертационного совета (ауд.220).

Тел./Факс: (812)316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/boyarincev-andrey-vladimirovich>.

Автореферат разослан «12» декабря 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



В. В. Конюшков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Территориальное расположение Российской Федерации, особенности её климата формируют уникальные инженерно-геологические условия, которые ставят перед инженерами-строителями сложные геотехнические задачи при проектировании подземных частей зданий и сооружений. Среди них особое место занимают процессы морозного пучения грунтов, а также вопросы, связанные с распространением многолетнемерзлых грунтов на большей части территории страны.

В процессе морозного пучения грунта может возникать подъём конструкций, расположенных в нём. Это сложный физико-химический процесс, интенсивность которого зависит от большого числа факторов, в том числе от мощности деятельного слоя и взаимодействия промерзающего грунта с материалом фундамента. Следует отметить, что вся территория страны подвержена сезонному промерзанию грунта на глубины от 0,2 до 5 м, поэтому любой проект нового строительства или реконструкции, должен учитывать данные процессы, особенно если основание фундаментов представлено грунтами обладающими пучинистыми свойствами.

Оценка устойчивости фундамента при действии касательных сил морозного пучения, как правило, сводится к решению статической задачи, где с одной стороны к свае приложена сумма сил, пытающихся «поднять» её (силы морозного пучения грунта и выдёргивающие усилия от надземной части здания), а с другой – сумма сил, препятствующая «поднятию» и состоящая из суммы веса фундамента и сил трения и сцепления с грунтами, не подверженными сезонному промерзанию. Последние могут быть как в мёрзлом, так и немёрзлом состояниях. Величина касательной силы морозного пучения грунта будет зависеть, главным образом, от глубины его промерзания вокруг сваи и силы смерзания её поверхности с грунтом. А величина усилия анкерования сваи в слоях не подверженных сезонному промерзанию, будут зависеть от сил трения, или прочности смерзания, на боковой поверхности сваи, в зависимости от состояния грунта. При этом свойства материала сваи будут оказывать влияние на интенсивность развития описанных процессов.

Таким образом, технико-экономическая эффективность проекта нового строительства или реконструкции, а также его долговечность в условиях развития воздействия касательных сил морозного пучения, главным образом, зависит от свойств материала фундамента, влияющих на мощность деятельного слоя, а также от значений усилий, возникающих на контакте «грунт-материал». В связи с этим, исследование влияния различных свойств материала сваи на мощность деятельного слоя, а также величину усилий на контакте «грунт-свая», как сезоннопромерзающего грунта, так и грунтов

в мёрзлом и немёрзлом состояниях, расположенных ниже деятельного слоя, является *актуальным*.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в исследование несущей способности свай в немёрзлых грунтах внесли А.Г. Явейн, В.Н. Морозов, Ф.К. Лапшин, Ю.В. Россихин, М.М. Алдунгаров, В.М. Швецов, Г.Н. Яссиевич, В.Г. Федоровский, В.В. Лушников, Р.А. Мангушев, З.Г. Тер-Мартirosян, А.Л.Готман, В.В. Знаменский, Е.Л. Пылаев, Е.Э. Девальтовский, Б.С. Юшков, А.Г. Шашкин, А.Б. Пономарёв, О.А. Шулятьев, С.О. Шулятьев, Р.Ф. Шарфутдинов, А.И. Полищук, В.С. Уткин, А.Н. Гайдо, А.И. Осокин, А.В. Кузнецов, В.В. Конюшков, А.В. Сбитнев, А.Д. Набережный, М.А. Самохвалов, А.Е. Саввина, А.О. Добрынин, С.А. Зеньков, В.С. Уткин, А.В. Ершов, М. Pando, A. Mirmiran, M. Shahawy, M. Iskander, E. Guades, A. Fam, H.A. Shaia, A.K. Al-Asadi, S.H. Ramadan, A. Almallah, H. Naggar, P. Sadeghian, J. Giraldo, M.T. Rayhani, H. S. Aksoy, M. Gor, K. Yin, A. Fauchille, E. Filippo, P. Kotronis, G. Sciara, G. Sreelakshmi, M.N. Asha, L. Thejus, M. Zhang, S. Sang, Y. Wang, Z. Bai, H. Canakci, F. Celik, M. Hamed, W. Sidik.

Изучению касательных сил морозного пучения и несущей способности фундаментов в условиях распространения многолетнемёрзлых грунтов посвящены работы Н.А. Цытовича, С.С. Вялова, Б.И. Далматова, А.М. Пчелинцева, Л.В. Чистотинова, И.И. Сахарова, В.Д. Карлова, В.М. Соколова, Б.Б. Бакенова, В.М. Улицкого, В.Г. Кондратьева, Л.Н. Хрусталёва, В.В. Пасека, С.И. Алексеева, В.Н. Парамонова, С.В. Волохова, А.Л. Невзорова, О.Р. Голли, Р.Ш. Абжалимова, В.Г. Чеверева, В.А. Шорина, Г.Г. Болдырёва, А.Г. Алексеева, С.А. Гулого, А.В. Иоспы, Н.А. Устяна, В.М. Гольцова, Ю.В. Сафронова, В.И. Аксёнова, Д.В. Кривова, В.В. Дорошина, А.В. Мельникова, М.В. Парамонова, Д.Г. Скопинцева, Д.В. Алявдина, П.И. Романова, В.И. Исаева, П.М. Сазонова, Э.С. Гречищевой, E. Penner, G. Chao, Zh. Lu, S. Akagawa, G. Dore, J. Qi, F. Yu, B. Ladanyi, A. Foriero, G. Qu, Y. Shang, F. Niu, J. Fang, L. Wu.

Распределению температур в грунтовом массиве посвящены работы В.Н. Иванова, С.А. Кудрявцева, В.П. Мельникова, Я.Б. Горелика, Б.Г. Аксёнова, Г.М. Долгих, Е.С. Ашпиза, Г.В. Аникина, А.Н. Курчатовой, В.Я. и Я.А. Кроник, Н.И. Осокина, А.В. Захарова, Е.Е. Мичульской, И.М. Школьника, Е.Д. Надёжиной, Д.С. Паздерина, Д.Г. Цвигунова, К.С. Иванова, Д.Р. Галлямова, А.Ф. Жиркова, М.Н. Железняк, Л.Г. Нерадовского, Y. Lai, P. Gauer, J. Johnson.

Несмотря на большое количество научных работ, посвящённых механическому и теплофизическому взаимодействию свай с немёрзлыми и многолетнемёрзлыми грунтами основания в условиях сезонного промерзания, в настоящее время слабоизученными остаются вопросы влияния

свойств материала сваи на развитие толщины деятельного слоя и усилий, возникающих на контакте свай и грунтов в нёмёрзлом и многолетнемёрзлом состояниях.

Цель работы. Экспериментально-теоретическое изучение влияния свойств материала конструкции свайного фундамента на физические, теплофизические и механические процессы, происходящих в грунте вокруг сваи в условиях сезонного промерзания грунта; разработка конструктивных решений на основе проведённых исследований.

Задачи исследования:

1. Определить, путём численного моделирования, влияние теплофизических параметров сваи на развитие толщины деятельного слоя и их сопоставление с результатами лабораторных экспериментов;
2. Экспериментально исследовать влияние свойств материала поверхности сваи на силы трения, возникающие на контакте «нёмёрзлый грунт-материал фундамента» и прочность смерзания на контакте «мёрзлый грунт-материал фундамента»;
3. Разработать конструктивные решения свай из композитных материалов на основе результатов проведённых экспериментов;
4. Подтвердить натурными экспериментами результаты лабораторных и численных экспериментов, а также оценить техническую эффективность разработанных конструктивных решений свай из композитных материалов.

Объект исследования. Свая в условиях сезонного промерзания основания, сопровождающегося воздействием касательных сил морозного пучения.

Предмет исследования. Теплофизические и механические процессы, происходящие в грунтах, включающих сваи, в условиях сезонного промерзания.

Научна новизна исследования заключается в достижении следующих конкретных результатов:

1. Установлена причина формирования воронки из деятельного слоя грунта у свайного фундамента. Определено влияние конструктивных и теплофизических параметров свай на размеры деятельного слоя при сезонном промерзании и оттаивании.
2. Экспериментально установлены зависимости угла трения на контакте «нёмёрзлый грунт-фундамент» от соотношения величины шероховатости поверхности его материала и размера твёрдых частиц грунта, сцепления на контакте «нёмёрзлый грунт-фундамент» от плотности расположения микронеровностей его поверхности, угла трения при длительных испытаниях на контакте «мёрзлый грунт-фундамент» от шероховатости поверхности свайного фундамента, сцепления при длительных испытаниях на контакте «мёрзлый грунт-фундамент» от величины гидрофобности поверхности свайного фундамента.

3. Разработан метод лабораторного определения величины прочности смерзания многолетнемёрзлых и сезонномёрзлых грунтов с материалом фундамента.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке методики определения сил трения на контакте «немёрзлый грунт-материал фундамента» и определения прочности смерзания мёрзлых грунтов с материалом фундамента (патент на изобретение № 2749226), способа повышения несущей способности свай по грунту (патент на изобретение № 2720595), способа повышения противопучинных свойств свай (патент на изобретение № 2763489), конструкций композитных свай (патенты на полезные модели № 205047, 207627), а также в подтверждении эффективности разработанной конструкции композитной противопучинной сваи по результатам комплексных экспериментальных крупномасштабных полевых исследований.

Методы исследований. В диссертационной работе использованы следующие методы исследования:

1. Анализ литературных источников, посвящённых изучению трения грунтов по материалам, прочности смерзания материалов с мёрзлыми грунтами, а также распределению температур в грунтовом массиве вокруг подземных сооружений.

2. Численное моделирование процесса распределения температур в грунтовом массиве при его промерзании и оттаивании;

3. Экспериментальные исследования на основе лабораторных испытаний на сдвиг и прочность смерзания грунтов по различным материалам;

4. Натурные эксперименты по исследованию степени сопротивления свай различных конструкций воздействию касательным силам морозного пучения, а также оценке несущей способности свай по грунту посредством статических испытаний выдёргивающей нагрузкой.

5. Сопоставительный анализ результатов полевых, лабораторных и теоретических экспериментов.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 02.01.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения:

– пункт 2 «Создание научных и методологических основ фундаментостроения и подземного строительства в сложных инженерно-геологических, гидрогеологических и природно-климатических условиях, а также при особых природных и техногенных воздействиях»;

– пункт 5 «Разработка новых методов расчета, высокоэффективных конструкций и способов устройства оснований и фундаментов в особых инженерно-геологических условиях: на слабых, насыпных, просадочных, засоленных, набухающих, закарстованных, вечномерзлых, пучинистых и других грунтах».

Достоверность результатов исследований и выводов диссертационной работы базируется на применении основных теоретических положений

механики грунтов, геотехники, материаловедения и математической статистики; обеспечивается необходимым объемом лабораторных и натуральных экспериментальных исследований, выполненных на поверенном оборудовании, а также использованием сертифицированных лицензионных программных комплексов при выполнении численного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты численного моделирования процесса распределения температуры грунта вокруг фундамента при промерзании и оттаивании основания;
2. Методики определения прочности сдвига и прочности смерзания на контакте «грунт-материал фундамент»;
3. Результаты экспериментальных исследований зависимости прочности сдвига и прочности смерзания на контакте «грунт-материал фундамент» от гидрофобности и шероховатости материала фундамента;
4. Научно-техническое обоснование разработанной конструкции композитной противоположенной сваи на основе проведённых исследований.

Личный вклад автора состоит в формулировании целей и задач, поиске их решения путём теоретических и экспериментальных исследований, анализе полученных результатов, разработке на их основе конструктивных решений фундаментов зданий и сооружений в условиях сезонного промерзания грунтов, формулирование основных выводов.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: международной научно-технической конференции по геотехнике «Современные теоретические и практические вопросы геотехники: новые материалы, конструкции, технологии и методики расчётов» (27–29 октября 2021 г., СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург), международной научно-практической конференции «современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике» (8–12 ноября 2021 г., г. Салехард), IV Международной научно-технической конференции «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении» (28–30 сентября 2022 г., г. Новочеркасск).

Публикации. Основные результаты работы представлены в 27 научных статьях, 9 из которых в рецензируемых изданиях из перечня ВАК, четыре – в рецензируемых изданиях из перечня Scopus. По результатам работы получено три патента на изобретения №2720595, 2749226, 2763489 и два на полезную модель № 205047, 207627.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работы состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка литературы, включающего 160 наименований, в том числе 44 на иностранном языке, и четырёх приложений. Общий объём работы составляет 190 страниц машинописного текста, включая 88 рисунков, 24 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, её научная новизна, цель исследования.

Первая глава посвящена обзору способов защиты фундаментов от воздействия касательных сил морозного пучения и процессов взаимодействия фундамента и промерзающего грунта, на которых основаны существующие методы защиты.

Опыт строительства в условиях распространения сезонно- и многолетнемёрзлых грунтов показывает, что половина причин аварий инфраструктурных объектов приходится на морозное пучение. Это согласуется с анализом материалов обследования повреждённых сооружений в составе дальневосточной железной дороги, а также результатами опроса практикующих специалистов.

Проанализированы работы, посвящённые изучению процесса промерзания грунтов и природы касательных сил морозного пучения. Выделены основные факторы, влияющие на касательные силы морозного пучения, основную роль среди которых играют мощность деятельного слоя и прочность смерзания грунта с материалом фундамента.

Рядом специалистов неоднократно фиксировалось влияние свай на распределение температуры в грунтовом массиве, предположительно вызванным теплофизическими свойствами материала сваи. Кроме того, исследователями отмечаются значительные различия в прочности смерзания для различных материалов, предположительно объясняемые свойствами их поверхности. Тем не менее, более детального изучения данные предположения не получили.

Нами произведён обзор методов защиты фундаментов от касательных сил морозного пучения. Особое внимание посвящено конструкциям противопучинных свай. При сезонном промерзании, для восприятия сил пучения такие сваи анкеруются в слоях грунта, не подверженных промерзанию. Изучены работы по оценке несущей способности свай по грунту, как в мёрзлом, так и немёрзлом состояниях. Особое внимание посвящено исследованиям трения на контакте «не мёрзлый грунт-свая», в которых установлено влияние шероховатости поверхности на угол трения, описаны различные типы разрушения: по линии «грунт-грунт» и «грунт-свая», при этом исследования, преимущественно, выполнялись на песчаных грунтах, а полученные значения носят противоречивый характер.

На основе проведённого литературного обзора по теме исследований были сформулированы *цель и задачи диссертационной работы*.

Во второй главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по оценке влияния теплофизических свойств материала свай на распределение температур в грунте при его промерзании.

Проведено численное моделирование промерзания немерзлого и оттаивания мерзлого грунта вокруг сваи. Установлено, что наличие сваи способствует образованию воронки деятельного слоя грунта у тела сваи (рис. 1). Для установления причин образования данной воронки и оценке её размеров, было выделено восемь факторов: теплопроводность и теплоёмкость материала сваи, размер её поперечного сечения, длина и высота надземной части, а также среднезимняя температура, условия теплообмена на границе «грунт-воздух».

В общем, выполнено моделирование 256 случаев, в каждом из которых изменялся один параметр. Моделирование производилось в программе *Qfrost*, реализующем конечно-разностный метод определения температуры каждой точки расчётной модели, с учётом изменения температуры воздуха за год, условий теплопередачи между грунтом и атмосферой и переходов грунта из талого состояния в мерзлое и обратно, без учета массопереноса в грунте. При моделировании фиксировались глубины промерзания грунта у сваи и вдали от неё, а также радиус влияния. Рассчитывался коэффициент k , равный отношению глубин промерзания грунта у сваи и вдали от неё.

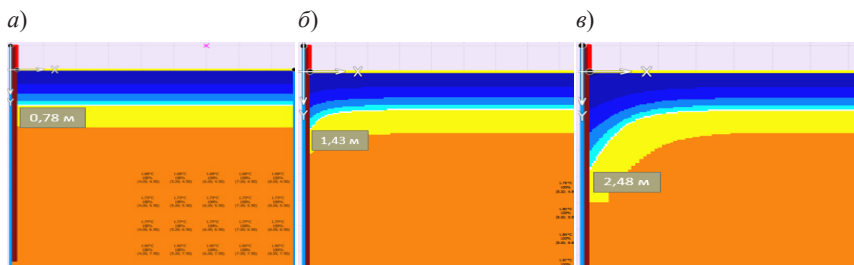


Рис. 1. Распределение температур грунта у различных фундаментов
 а) сплошная стеклопластиковая свая (осесимметричная задача, $\lambda_{св}=0,25$ Вт/м·К);
 б) сплошная стальная свая (осесимметричная задача, $\lambda_{св}=25$ Вт/м·К);
 в) ленточный фундамент (плоская задача, $\lambda_{ф}=25$ Вт/м·К)

Результаты моделирования показали, что воронка образуется если общая теплопроводность материала сваи выше теплопроводности грунта. При возникновении воронки, на её размеры влияют почти все рассмотренные факторы, кроме теплоёмкости материала фундамента и высоты надземной части сваи. Последнее можно объяснить тем, что при моделировании не учитывалось влияние солнечной радиации. Основные зависимости размеров образуемой воронки представлены на рис. 2.

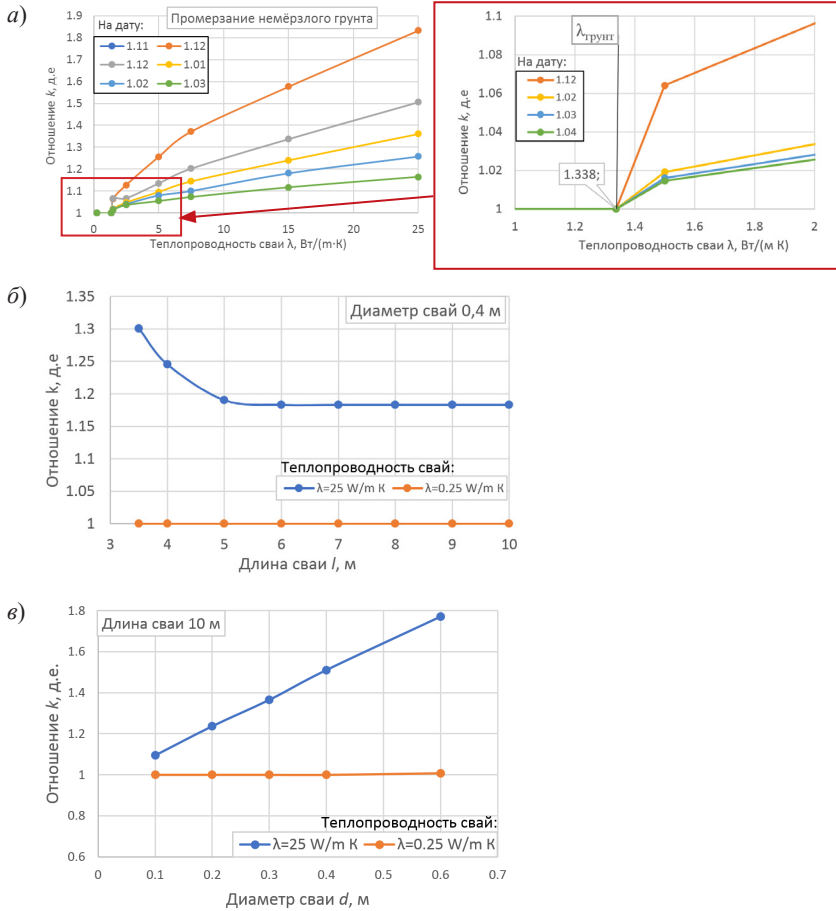


Рис. 2. Основные закономерности формирования воронки деятельного слоя у свай при промерзании: а) отношение мощностей деятельного слоя у свай и вдали от неё k в зависимости от коэффициента теплопроводности материала свай; б) то же, в зависимости от длины свай; в) то же, в зависимости от диаметра свай

Следует отметить, что при отсутствии возникновения воронки исключается необходимость расчёта её размеров, требующего учёта множества факторов. Кроме того, снижаются силы морозного пучения за счёт уменьшения деятельного слоя, снижения скорости промерзания и объёма, мигрирующей к фронту промерзания, влаги. Таким образом, может быть рекомендовано

использование свай, теплопроводность которых ниже теплопроводности грунта, например композитных свай.

Третья глава посвящена экспериментальному изучению механического взаимодействия грунтов в немёрзлом и мёрзлом состояниях с материалами свай.

В первой серии экспериментов моделировалось поведение сваи при её анкеровке в не мёрзлых грунтах и оценивалась зависимость трения и сцепления на контакте «немёрзлый грунт-материал сваи» от свойств материала. Первоначально, измерялись параметры поверхности изучаемых материалов: стали, бетона, трёх видов полимера и образцов, покрытых песком. Для каждого образца устанавливались угол смачивания поверхности, а также параметры шероховатости. Далее оценивалась прочность сдвига немёрзлого грунта по материалам. Для этого, на приборе одноплоскостного среза, где в подвижной части размещался образец материала, а в неподвижной – грунт, определялись сдвиговые усилия при различных нормальных нагрузках, устанавливались параметры трения и сцепления на контакте. Касательное напряжение во время сдвига грунта по материалу при одном значении нормальной нагрузки определялось 6 раз для обеспечения статистической значимости результатов.

Результаты показали, что при сдвиге грунта по материалу (гладкое разрушение), угол трения увеличивается с ростом шероховатости. С ростом грубости поверхности материала линия сдвига переносится с линии контакта в грунт (грубое разрушение) угол трения, при этом, становится равным углу внутреннего трения грунта. Данный результат согласуется с наблюдением многих исследователей.

Переход от «гладкого» разрушения к «грубому» реализуется при некотором критическом значении шероховатости, пример определения которого представлен на рис. 3, а. Экспериментально установлено, что величина критической шероховатости зависит от размера частиц грунта: чем частицы крупнее, тем большая шероховатость необходима для переноса линии разрушения с места контакта в грунт (рис. 3, б). По установленным закономерностям была предложена номограмма для определения угла трения грунта по подземной конструкции исходя из её шероховатости и крупности частиц грунта (рис. 3, в).

Переход от «гладкого» разрушения к «грубому» реализуется при некотором критическом значении шероховатости, пример определения которого представлен на рис. 3, а. Экспериментально установлено, что величина критической шероховатости зависит от размера частиц грунта: чем частицы крупнее, тем большая шероховатость необходима для переноса линии разрушения с места контакта в грунт (рис. 3, б). По установленным закономерностям была предложена номограмма для определения угла трения грунта по подземной конструкции исходя из её шероховатости и крупности частиц грунта (рис. 3, в).

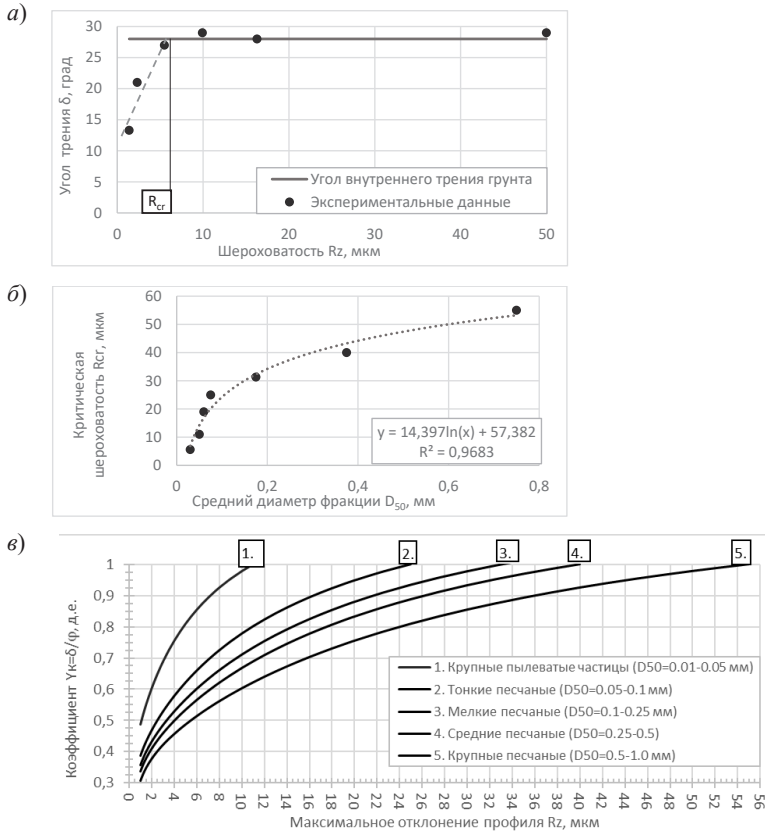


Рис. 3. Результаты испытаний немёрзлого грунта на сдвиг по материалам
 а) график зависимости угла контактного трения от шероховатости испытуемого материала; б) график зависимости критической шероховатости от крупности частиц грунта; в) предложенная номограмма для определения коэффициента γ_k от шероховатости материала и крупности частиц грунта

Во второй серии экспериментов моделировалось взаимодействие пучащегося грунта и материала сваи. Исходя из предположения об условно мгновенном приложении нагрузки пучащегося грунта, оценивалась зависимость мгновенной прочности смерзания от свойств рассматриваемых материалов. Исследование производилось с теми же грунтами и материалами, что и в предыдущей серии.

При изучении мгновенной прочности смерзания к рассмотрению дополнительно были приняты два образца стеклопластика, выполненных из различных полимерных смол. Испытания выполнялись двумя методами: по ГОСТ 12248.8 и по авторской (Патент РФ 2749226, рис. 4, а). В обоих

методиках образцы материала смерзались с грунтом при одинаковой температуре, а внешнее усилие прикладывалось с одной скоростью. Различие методик заключалось в форме образцов материала, обусловленное технологией их изготовления. В методике ГОСТ образцы представляли собой круглые пластины, а в методике автора – кольца с соотношением диаметра образца к его высоте равным 1 (рис. 4, б). Результаты испытаний образцов, покрытых песком одной крупности, по двум методикам показали близкие значения, погрешность составила 1,4 %, что позволяет сравнивать получаемые по двум методикам данные. Значения мгновенной прочности определялось не менее 6 раз для обеспечения статистической значимости получаемых результатов.

Следует отметить, что характер разрушения при испытании образцов, покрытых песком, отличается от разрушения образцов без покрытия (рис. 4, в, з). Это свидетельствует о переносе линии разрушения с «грунт-материал» на «грунт-грунт». Далее анализ выполнялся для материалов, у которых реализовалось разрушение по линии «грунт-материал». Сопоставление полученных мгновенных прочностей смерзания и свойств поверхности испытуемых материалов выявило зависимость мгновенной прочности смерзания грунта и материала от его гидрофобности (рис. 4, д): с увеличением угла смачивания, т.е. с ростом гидрофобности, уменьшается мгновенная прочность смерзания материала и грунта. Анализируя результаты для материалов с одним значением угла смачивания, отмечается зависимость мгновенной прочности смерзания от шероховатости (рис. 4, е). Таким образом, рекомендуется в зоне деятельного слоя поверхность сваи выполнять из гладких и гидрофобных материалов.

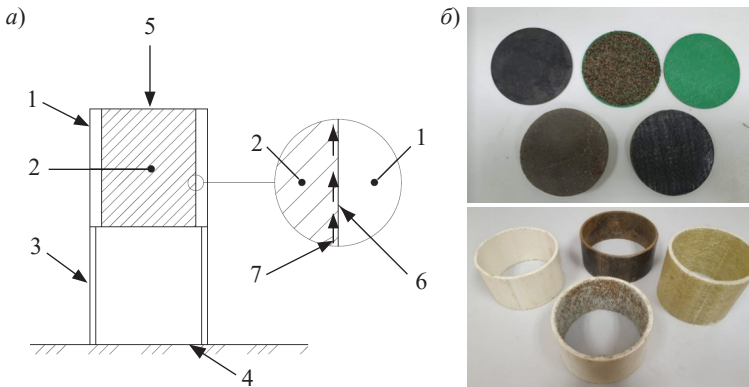


Рис. 4, начало. Экспериментальное изучение взаимодействия испытуемого мёрзлого грунта и материалов свай при мгновенном приложении нагрузки: а) схема авторской методики определения прочности смерзания; б) образцы испытуемых материалов: 1 – испытуемый материал; 2 – испытуемый грунт; 3 – пустотелая опора; 4 – горизонтальная поверхность; 5 – продавливающее усилие; 6 – граница «грунт-материал»; 7 – реактивные силы прочности смерзания

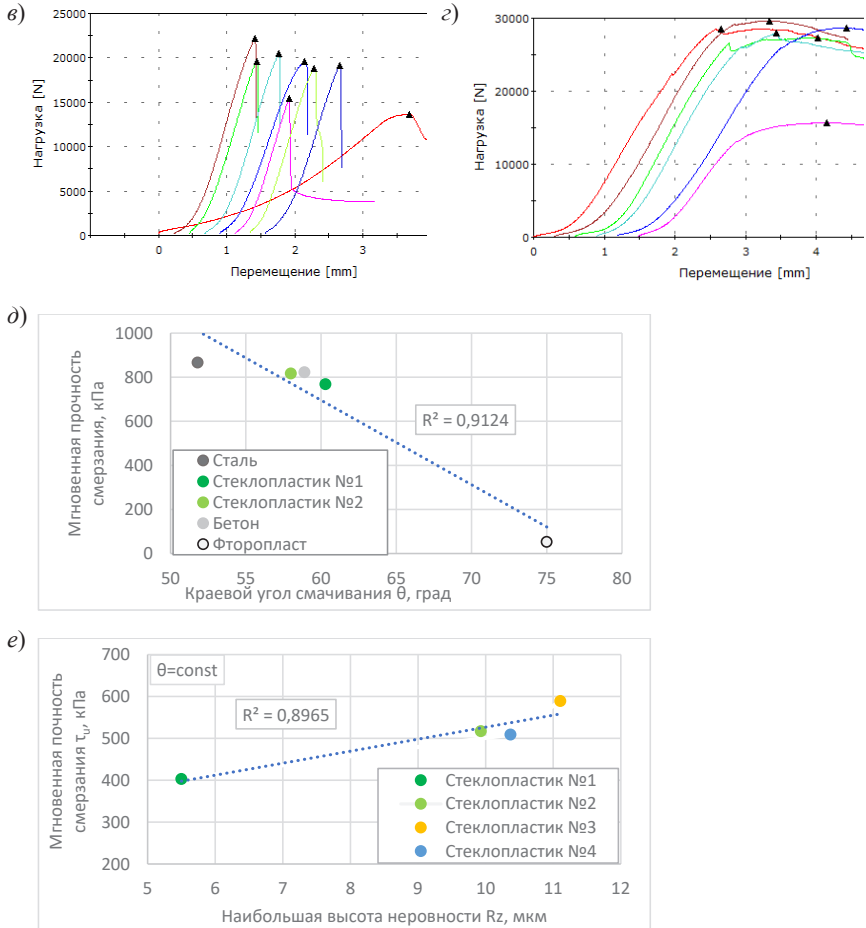


Рис. 4, окончание. Экспериментальное изучение взаимодействия испытуемого мёрзлого грунта и материалов свай при мгновенном приложении нагрузки:

6) график зависимости «перемещения-усилия» при определении прочности смерзания с гладкими материалами (сталь, стеклопластик, бетон); 7) график зависимости «перемещения-усилия» при определении прочности смерзания с материалом, покрытым песком; 8) зависимость мгновенной прочности смерзания от гидрофобности материала; 9) зависимость мгновенной прочности смерзания от шероховатости материала при условии равенства гидрофобности испытуемых образцов; 1 – испытуемый материал; 2 – испытуемый грунт; 3 – пустотелая опора; 4 – горизонтальная поверхность; 5 – продавливающее усилие; 6 – граница «грунт-материал»; 7 – реактивные силы прочности смерзания

Во третьей серии экспериментов моделировалось поведение сваи при её анкеровке в многолетнемёрзлых грунтах и оценивалась зависимость параметров трения и сцепления на контакте «мёрзлый грунт-свая» от свойств материала сваи при длительном действии сдвигающей нагрузки. Испытания выполнялись на доработанных сдвиговых приборах полевой лаборатории Литвинова (рис. 5, а) позволяющих препятствовать движению пластины материала (рис. 5, б). Перед испытаниями уточнялась массы грузов на поверенных электронных весах, а также соотношение плеч рычажной системы при помощи откалиброванного динамометра при температуре испытаний. Испытания выполнялись с образцами стали, стеклопластика, фторопласта и бетона – условно гладкими материалами, с которыми было реализовано разрушение по линии «мёрзлый грунт-материал».

Определения длительной прочности смерзания выполнялось при различных нормальных поверхности сдвига напряжениях, что позволило установить угол трения и сцепление мёрзлого грунта с различными материалами.

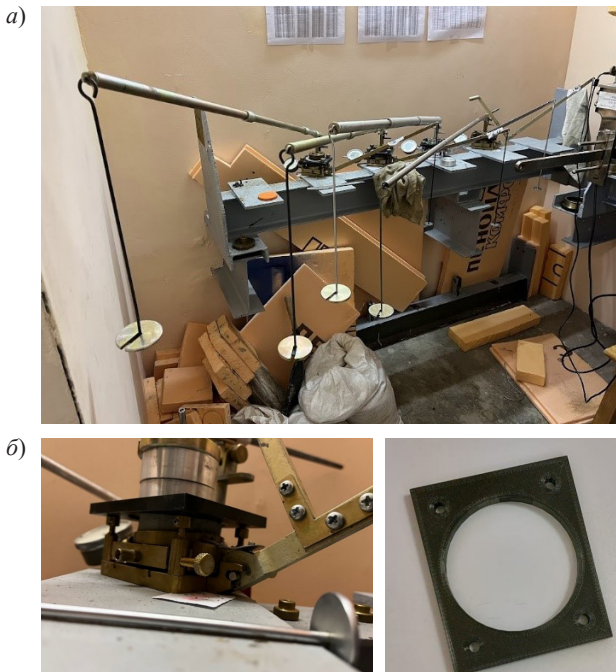


Рис. 5, начало. Результаты определения длительной прочности смерзания грунта с различными материалами: а) процесс испытания; б) модернизированный сдвиговой прибор полевой лаборатории Литвинова

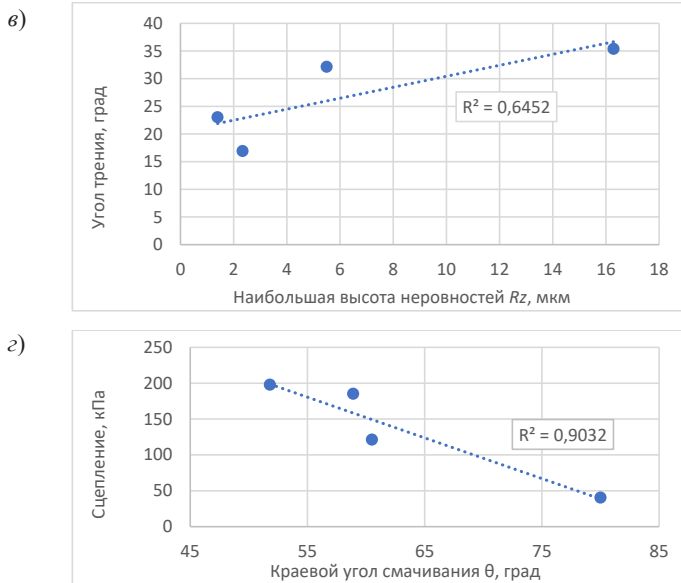


Рис. 5, *окончание*. Результаты определения длительной прочности смерзания грунта с различными материалами: в) зависимость угла трения мёрзлого грунта по материалу от его шероховатости при длительном приложении нагрузки; г) зависимость сцепления мёрзлого грунта с материалом от значения его краевого угла смачивания

Сопоставление установленных углов трения и сцеплений со свойствами поверхностей материалов позволяет судить о зависимости угла трения мёрзлого грунта по материалу от его шероховатости: чем выше шероховатость материала, тем выше значение угла трения мёрзлого грунта на их контакте; и зависимость сцепления мёрзлого грунта на контакте с материалом от его гидрофобности: чем материал более гидрофобен, тем ниже сцепление материала с мёрзлым грунтом на их контакте (рис. 5, в, г).

В четвёртой главе приведено описание технических решений, разработанных на основе полученных закономерностей, а также их испытаний в натуральных условиях.

На основе выводов второй и третьей глав работы, предложена конструкция композитной противопучинной сваи (далее КПС) (рис. 6, а). Принцип её работы основан на зависимости прочности смерзания грунта от гидрофобности сваи, влиянии шероховатости наружной поверхности материала сваи на перенос линии разрушения грунта, как в мёрзлом, так и не мёрзлом состояниях, с границы «грунт-свая» на «грунт-грунт» и на понимании природы возникновения у сваи воронки деятельного слоя. Предлагаемая свая

выполнена из композитной трубы и включает два участка: анкерный, расположенный в слоях грунта ниже его промерзания, и противопучинный, предназначенный для размещения в зоне деятельного слоя. Теплопроводность композита значительно ниже теплопроводности грунта, что исключает возникновение воронки деятельного слоя. На анкерном участке наружная поверхность сваи покрывается песком (рис. 6, б, в), что обеспечивает эффективную анкеровку сваи в грунтах, как в мёрзлом, так и немёрзлом состояниях.

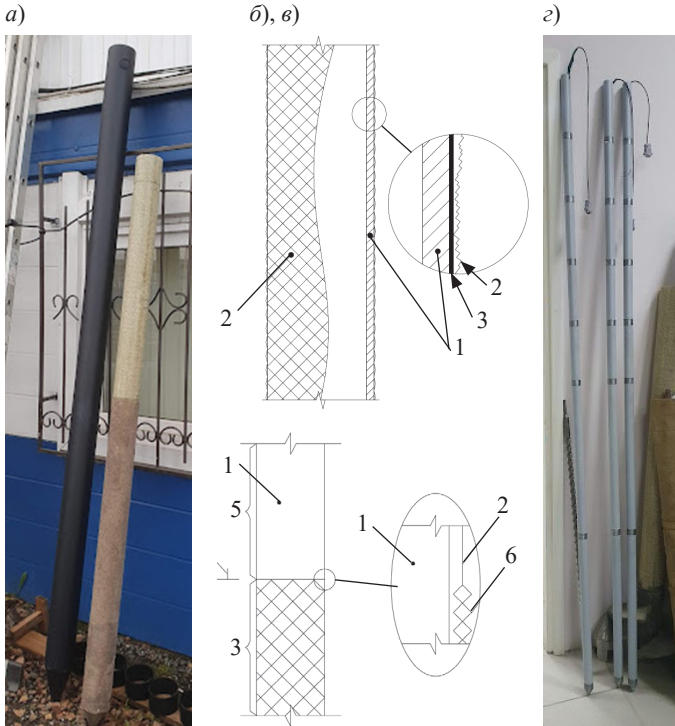


Рис. 6. Технические решения, предложенные на основе закономерностей, полученных в рамках диссертационного исследования: а) КПС (справа); б) способ повышения несущей способности свай по грунту; в) способ повышения противопучинных свойств свай; з) средство измерения температуры грунта композитная

На противопучинном участке оставляется заводская поверхность композитной трубы, характеризующаяся гидрофобностью и низкой шероховатостью, что обеспечивает снижение касательных сил морозного пучения. Свая может иметь круглое или эллиптическое поперечное сечение и состоять из двух частей, соединенных между собой посредством клея и муфты меньшего диаметра. Полость трубы может быть заполнена бетоном.

Испытания КПС проводились на опытной площадке, грунты которой представлены супесью пластичной сильнопучинистой со следующими характеристиками: $\gamma = 19,5 \text{ кН/м}^3$; $\varepsilon_{ph} = 0,12 \text{ д.е.}$; $e = 0,6 \text{ д.е.}$, $w = 21 \%$, $\varphi = 28^\circ$; $c = 30 \text{ кПа}$.

На глубину 1,6 м были погружены две сваи: стальная и КПС. Зона анкеровки композитной сваи располагалась на глубине 0,5 м от уровня планировки опытной площадки, длина анкерного участка составляла 1,1 м. Стальная свая представлена классической конструкцией, без применения каких-либо средств защиты от сил морозного пучения. Схема устройства и общий вид площадки представлен на рис. 7, а, б.

На первом этапе эксперимента были выполнены лабораторные испытания грунтов и материалов свай. На приборе одноплоскостного среза были определены силы трения и сцепления грунта опытной площадки на контакте с материалами свай, а также с поверхностью, усиленной песком (рис. 6, б). Продавливая грунт со скоростью морозного пучения сквозь образцы в виде колец, вырезанных из испытуемых свай, были установлены касательные силы морозного пучения. На основе этих характеристик были рассчитаны глубины промерзания, при которых касательные силы морозного пучения, действующие на сваи, превысят сумму сил, удерживающую их от перемещения.

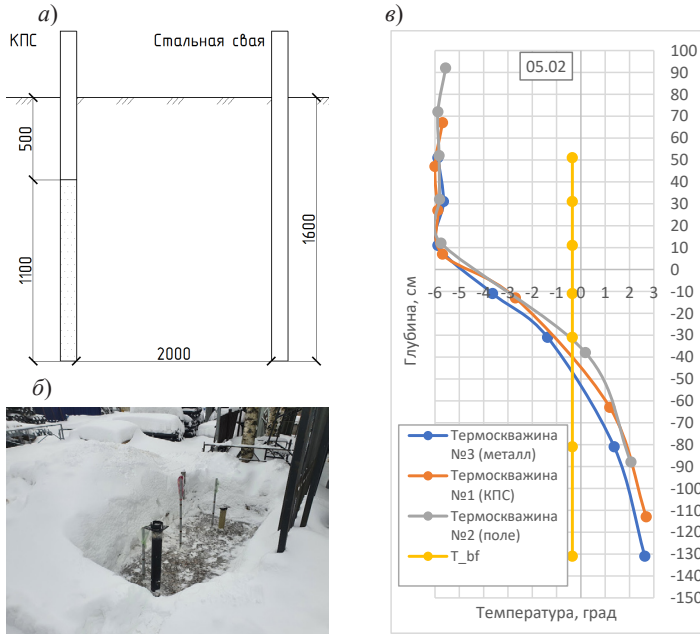


Рис. 7, начало. Результаты наблюдения на опытной площадке в течение зимы 2021–2022 гг: а) схема устройства опытной площадки; б) фотография опытно площадки; в) распределение температур в грунтовом массиве на 05.02.22 г.

з)

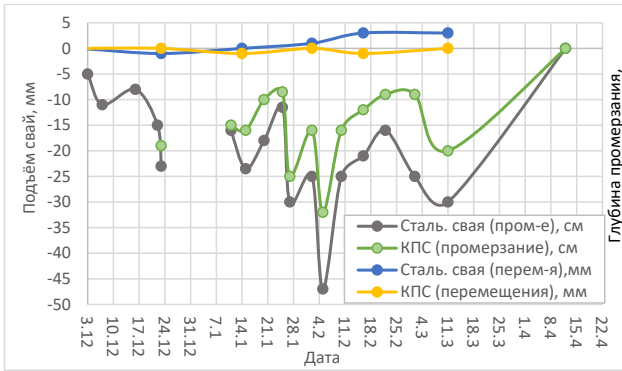


Рис. 7, окончание. Результаты наблюдения на опытной площадке в течение зимы 2021–2022 гг: з) изменение вертикального положения свай во времени

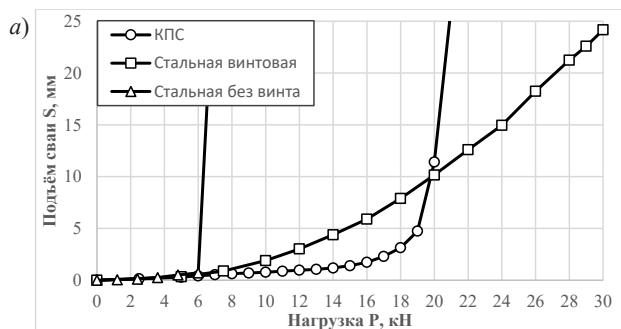
На втором этапе испытаний было установлено наблюдение за сваями в процессе промерзания грунта зимой 2021–2022 гг. У свай были установлены термометрические скважины, конструкции разработанной автором (см. рис. 6, з), с расположением датчиков измерения температуры по глубине грунта, а также воздуха над площадкой. На головах свай были установлены геодезические марки, для наблюдения за подъёмом свай в процессе промерзания грунта. Показания датчиков температуры снимались дважды в неделю. Контроль изменения вертикального и планового положения свай – один раз в две недели. Результаты наблюдений представлены на рис. 7, в.

Анализ результатов показывает, что температура грунта у КПС соответствует температурам грунта, на расстоянии 1 м от неё. Тогда как температура грунта у стальной сваи ниже на значение до 1° , в зависимости от рассматриваемой глубины, а фронт промерзания опустился ниже на 15 см по сравнению с температурой грунта на расстоянии 1 м от стальной сваи. Данные результаты подтвердили положения главы 2 о влиянии теплопроводности материала сваи на распределение температур в грунте.

Наблюдение за вертикальным перемещением свай показали развитие подъёма стальной сваи до 3 мм при промерзании грунта на 0,47 м (см. рис. 7, з). При этом положение верха КПС осталось без изменений. Данные результаты соответствуют рассчитанным значениям, основанным на лабораторных испытаниях, которые показали, что касательные силы пучения, действующие на стальную сваю, превысят силы её анкеровки при глубине промерзания 0,23 м, что и было отмечено в ходе наблюдения. Отметим, что рассчитанная равновесная глубина промерзания для КПС, равная 0,39 м, так и не была достигнута, что объясняет отсутствие её подъёма. Также, выполненные наблюдения доказывают валидность использованной аналитической методики оценки устойчивости свай на действие касательных сил морозного пучения с использованием экспериментальных данных.

На третьем этапе испытаний выполнено статическое нагружение свай выдёргивающей нагрузкой в соответствии с ГОСТ5986. К описанным ранее, дополнительно была испытана стальная винтовая свая, погруженная на той же опытной площадке, на ту же глубину, что и остальные испытуемые сваи, диаметр ствола сваи – 108 мм, диаметр лопасти – 284 мм. Нагружение выполнялось домкратом грузоподъёмностью 5 т, наблюдения за деформациями – прогибомером. Результаты полевых испытаний и процесс их проведения представлены на рис. 8.

Результаты показали, что несущая способность стальной сваи по грунту без винта составила 6 кН, винтовой сваи-30 кН, а КПС-20 кН, что согласуется с результатами аналитических расчётов. Таким образом, несущая способность КПС в 3,3 раз выше стальной сваи без винта и на 30 % ниже винтовой сваи, а деформация КПС при нагрузке 18 кН в 2,6 раз меньше деформации винтовой сваи.



б)



Рис. 8. Полевые испытания свай статической выдёргивающей нагрузкой: а) результаты испытаний; б) процесс испытаний

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе многофакторного численного анализа установлено, что воронка деятельного слоя образуется у сваи в том случае, если общая теплопроводность материала сваи выше теплопроводности грунта основания. Это подтверждается лабораторными испытаниями и полевыми наблюдениями. На размеры воронки влияют теплопроводность материала фундамента, тип фундамента (ленточный или свайный), его размеры (диаметр и длина), а также климатические параметры: среднезимняя температура воздуха, условия теплопередачи на границе «грунт-воздух».

2. Свойства наружной поверхности сваи играют определяющую роль в формировании прочности на её контакте с грунтом, как в мёрзлом, так и немёрзлом состояниях. Существует два типа разрушения: по линии «грунт-свая» и «грунт-грунт». Переход от одного типа разрушения к другому происходит в том случае, если шероховатость материала сваи больше, чем критическая шероховатость для конкретного грунта. Для грунтов в немёрзлом состоянии значение критической шероховатости поверхности материала зависит от крупности твёрдых частиц: чем больше крупность частиц, тем большая шероховатость материала необходима для переноса разрушения с линии «грунт-свая» на «грунт-грунт».

3. Сила анкеровки сваи в слоях грунта в немёрзлом состоянии при её сдвиге по боковой поверхности может быть описана законом Кулона-Мора. При разрушении по линии «грунт-грунт» могут использоваться угол трения и сцепления самого грунта, при разрушении по линии «грунт-свая» могут быть использованы угол трения и сцепление грунта на контакте с материалом сваи. Значение угла трения на контакте грунта со свайей зависит от отношения высоты неровностей поверхности материала сваи и крупности твёрдых частиц грунта, а сцепление грунта и материала сваи – от плотности расположения неровностей поверхности материала сваи;

4. Формирование величины прочности смерзания мёрзлого грунта с материалом сваи различно для случаев касательных сил морозного пучения и сил анкеровки сваи в слоях многолетнемёрзлого грунта. В случае касательных сил морозного пучения грунта прочность его смерзания с материалом сваи будет формироваться в верхних слоях грунта, где нормальные поверхности сдвига усилия незначительны. В данном случае, прочность смерзания, в первую очередь, будет зависеть от гидрофобности материала сваи, и уже во вторую очередь – от шероховатости её поверхности.

5. Работа сваи при её анкеровке в слоях многолетнемёрзлых грунтов характеризуется длительным приложением нагрузки и также может быть описана законом Кулона-Мора. При этом угол трения мёрзлого грунта по материалу сваи и их сцепление – величины, формирующие длительную прочность смерзания, имеют разную природу. Значение угла трения в зоне смерзания зависит

от шероховатости материала сваи: чем выше шероховатость материала, тем выше значение угла трения мёрзлого грунта по материалу. А значение сцепления зависит от гидрофобности материала: чем материал более гидрофобен, тем меньше значение сцепления на контакте мёрзлого грунта и материала.

6. На основе выводов 2–5, была разработана конструкция композитной противопучинной сваи. Даны рекомендации по её погружению в грунты, как в мёрзлом, так и немёрзлом состояниях, соединению с надземными конструкциями, аналитические способы оценки несущей способности по материалу сваи, а также аналитическая методика с учётом лабораторного определения параметров взаимодействия сваи с грунтами по оценке её устойчивости при действии касательной силы морозного пучения;

7. Испытания предложенной композитной противопучинной сваи в натуральных условиях доказали техническую эффективность её использования: максимальная глубина промерзания грунта у КПС на 20 % меньше, чем у стальной; несущая способность КПС по боковой поверхности в 3,3 раза больше по сравнению со стальной без винта, а деформации подъёма КПС при приложении выдерживающей нагрузки 18 кН в 2,6 раз меньше, чем у стальной винтовой сваи.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в рецензируемых изданиях из перечня ВАК

1. Бояринцев А.В, Мангушев Р.А., Русецкий А.А. Сравнительный расчёт ограждения котлованов методом шпунтовой стены и экранов жёсткости // Вестник гражданских инженеров. – 2018, № 1. – С. 75–82.

2. Бояринцев А. В. Репрезентативный анализ опыта строительства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2019. – Т.10, № 1.– С. 57–68.

3. Бояринцев А. В. Полимерные и композитные сваи. Мировой и отечественный опыт // ОФМГ, № 5 – 2020. – С. 22–27.

4. Бояринцев А.В. Оценка эффективности способа повышения несущей способности свай по грунту // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2(85). – С. 75–84.

5. Бояринцев А.В, Мангушев Р.А и др. Влияние вибропогружения шпунта на ранее выполненные буронабивные сваи // ОФМГ, № 5. – 2021. – С. 14–21.

6. Бояринцев А.В, Мангушев Р.А. и др. Эффект воздействия изготовления свай «Фундекс» на ранее выполненные конструкции // Жилищное строительство. 2021, № 9. – С. 28–35.

7. Бояринцев А.В., Заводчикова М.Б. и др. Поведение конструкций раскрепления котлована в зимних условиях // Construction and Geotechnics. – 2021, Т.12, № 4. – С. 37–53.

8. Бояринцев А.В., Матюшина В.А., Шорина А.Ю., Родионова Е.С. Опытное определение скорости морозного пучения для различных типов грунтов по степени пучинистости // Вестник Гражданских инженеров. 2022. № 2 (91). С. 66–73.

9. Бояринцев А.В, Ланько С.В., Зыбцева А.В. Теплотехническое влияние фундамента на глубину промерзания и оттаивания грунтов // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 14–23.

**Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых
в международных реферативных базах Scopus, Web of Science**

10. Boyarintsev A.V., Lanko S.V. Experimental estimate of instantaneous adfreeze strength of glass-fiber reinforced plastic in frozen soil // Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction – Mangushev et al. (Eds) © Taylor & Francis Group, London. 2019. Vol.2 P. 49–53. ISSN 2639-7749.

11. Boyarintsev A.V. Polymer and Composite Piles. International and Russian Experience// Soil Mechanics and Foundation Engineering, 57(5), 415–421.

12. Boyarintsev A.V., Mangushev R.A et al. Effect of vibratory sheet pile driving on previously constructed bored pile// Soil mechanics and foundation engineering. 2021. T.58. № 5. P. 374–382.

13. Boyarintsev A.V. et al. Experimental Determination of Frost Heaving Speed for Various Types of Soils According to the Degree of Heaving // E. Rybnov et al.(eds.), Proceedings of ARCTD 2021, Lecture Notes in Civil Engineering 206.

Объекты интеллектуальной деятельности

14. Патент 2720595 РФ, МПК E02D 5/24. Способ повышения несущей способности сваи по грунту / А. В. Бояринцев, С. В. Ланько; опубл. 12.05.2020 г.

15. Патент 2749226 РФ, МПК E02D 1/02. Способ определения прочности смерзания грунта. опубл. 07.06.2021 г.

16. Патент 205047 РФ, МПК E02D 5/48. Композитная противопучинная свая. опубл. 24.06.2021 г.

17. Патент 207627 РФ, МПК E02D 5/48. Композитная противопучинная свая. опубл. 08.11.2021 г.

18. Патент 2763489 РФ, МПК E02D 5/24. Способ повышения противопучинных свойств сваи. опубл. 29.12.2021 г.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 25.11.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 145.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.