

УДК 624.131

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙНО-ВИНТОВОГО ФУНДАМЕНТА В КРИОЛИТОЗОНЕ

Кулешов Александр Петрович¹,
87kuleshov@mail.ru

Николенко Ирина Александровна¹,
qwnwhalle@bk.ru

Горлов Андрей Александрович¹,
andrey.gor10@yandex.ru

¹ Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23.

Актуальность исследования заключается в проблеме расчета несущей способности винтовых свайных фундаментов в условиях распространения криолитозоны при воздействии статических выдерживающих и вдавливающих нагрузок. Свайно-винтовые фундаменты – довольно новый вид в строительстве, хотя первые упоминания о них относятся к концу XVIII – началу XIX вв. Данная технология зарекомендовала себя с самой наилучшей стороны. В последние годы винтовые сваи обрели широкую популярность при строительстве разнообразных объектов, однако все еще занимают относительно небольшую долю в фундаментостроении. Потенциал этой технологии слабо раскрыт, не регламентировано определение несущей способности в отечественных нормах.

Цель состоит в анализе существующих методик и разработке рекомендаций по расчету несущей способности свайно-винтовых фундаментов в условиях криолитозоны, сравнении результатов расчетов предельных сопротивлений данного вида фундамента, полученных различными методами, с натурными полевыми испытаниями и буропускными сваями.

Методы: систематизация, анализ отечественного и зарубежного опыта расчета винтовых свай в районах распространения многолетнемерзлых грунтов; сбор и обработка материалов полевых испытаний грунтов винтовыми сваями в районе обустройства Бованенковского месторождения; вычисление несущей способности различными методиками и сопоставление результатов с данными натурных полевых испытаний и буропускных свай; описание методики проведения полевых испытаний свай в условиях криолитозоны.

Результаты. Выполнены вычисления несущей способности винтовых свай в условиях криолитозоны различными описанными в литературных источниках методиками и их сопоставление с данными полевых натурных испытаний грунтов; проведена сравнительная оценка несущей способности винтовых свай с металлическими буропускными сваями с наконечником в одних и тех же геокриологических условиях, выявлены достоинства и недостатки рассмотренных методов и различных типов свайных фундаментов. На основе полученных результатов сделаны выводы о возможности применения винтовых свай в криолитозоне и получения необходимой и достаточной информации для их проектирования.

Ключевые слова: свайно-винтовые фундаменты, криолитозона, натурные полевые испытания, несущая способность, статические нагрузки, осадка, выход, боковая поверхность, острие, лопасть, методы расчета, сравнительный анализ, допустимая нагрузка, температура грунта.

Введение

Строительство любого здания и сооружения начинается прежде всего с возведения фундамента. Качество устройства фундамента и сопутствующие строительные-монтажные работы в дальнейшем обеспечивают надежное функционирование сооружения и являются весьма актуальной и с той же стороны проблематичной строительной и инженерной задачей, особенно в условиях распространения криолитозоны на фоне глобального процесса потепления климата [1–19].

С 1990-х годов в нашей стране масштабными темпами идет освоение нефтегазоносных провинций, что сопровождается проведением колоссальных работ по обустройству и открытию новых месторождений, расположенных в большей части на территориях Крайнего Севера, что, в свою очередь, диктует тенденцию пересмотра и детального анализа конструктивно-технологических решений при возведении фундаментов, внедрения современных технологий и

достижений науки, адаптации к суровым климатическим и разнообразным геокриологическим условиям.

Проектирование свайных фундаментов в условиях распространения криолитозоны (многолетнемерзлых грунтов – ММГ) производится согласно требованиям и указаниям действующей нормативной документации (СП 25.13330.2020) по двум принципам: I принцип – грунты используются в мерзлом состоянии; II принцип – грунты в предварительно оттаянном состоянии.

Анализируя и обобщая накопленный отечественный опыт по выполнению строительных работ на территории Крайнего Севера, можно сделать вывод, что именно фундаменты на сваях являются широко применяемыми. По материалу сваи бывают железобетонные, металлические и комбинированные, по способу устройства в многолетнемерзлый грунт – буропускные и бурозабивные, в некоторых случаях опускные.

Для железобетонных свай, установленных в криолитозоне, характерно их выпучивание и наблюдается

значительное смерзание боковой поверхности тела сваи с окружающим грунтом, что приводит к значительным повреждениям. Металлические сваи также испытывают воздействия процесса выпучивания из грунта при заполнении внутренней полости тела сваи раствором, но при этом характеризуются меньшим смерзанием.

На фоне этого в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов, в попытке уменьшить степень негативного воздействия процесса морозного пучения на эксплуатацию свайных фундаментов, в последние годы наметилась тенденция использования свайно-винтовых фундаментов, работающих как анкерная система и за счет наличия в нижней части винта уменьшающих выпирание сваи.

Использование в ММГ фундаментов из винтовых свай – перспективный метод при решении современных задач и проблем фундаментостроения.

Возможности применения винтовых свай при устройстве фундаментов в криолитозоне по-настоящему колоссальны. Отечественными учеными и представителями научно-производственных организаций: Д.Н. Иоспа, П.И. Романов, А.Б. Осокин, В.И. Аксенов, Л.И. Качановская, В.С. Бобров, А.Д. Набережный, С.Г. Геворкян, И.В. Носков, И.В. Крутиков, Ю.М. Гончаров, А.Н. Железков, Д.Н. Кривов и др., подробно изложены достоинства свайно-винтовых фундаментов по сравнению с другими видами свай в условиях распространения криолитозоны [20, 21].

Винтовая свая состоит из металлической трубы, верхняя часть которой ограничивается оголовком, а нижняя – анкером с лопастями. Количество лопастей свай, применяемых в настоящее время при строительстве, может быть различным, что, в свою очередь, способствует увеличению их несущей способности при вдавливающих и выдергивающих нагрузках.

Цель лопасти в составе винтовой сваи – одинаковое и равномерное распределение нагрузки, возникающей от сооружения на грунты основания, и уменьшение действия процесса пучение (выдергивание сваи) [22].

Конструкция современных винтовых свай характеризуется диаметром ствола от 5 до 50 см с толщиной стенок не менее 4 мм, длиной от нескольких до десятков метров, толщиной стенок лопасти около 5 мм. Ствол сваи (тело) покрывается антикоррозионным веществом и заполняется песчано-бетонным раствором после погружения в грунт. Вид наконечника с витками на нем определяется технологическими особенностями производителя-поставщика. В настоящее время существуют разновидности винтовых свай с литыми лопастями.

Конструкция винтовых свай (диаметр, длина, вид наконечника и шаг витков на нем) определяется прежде всего геокриологическими условиями, назначением и типом зданий и сооружений.

Для винтовых свай, используемых в условиях Крайнего Севера, в сравнении с тальмы грунтами, характерно большее число витков в лопасти, значительный их угол наклона и меньшее сечение тела сваи.

Для талых грунтов характерны широколопастные анкеры с заостренным наконечником, диаметр лопасти больше, чем тело самой сваи примерно в 1,5 раза (рис. 1, а), в многолетнемерзлых грунтах – узколопастные анкеры с отношением сечения лопасти и ствола меньше 1,5 раза (рис. 1, б) [20].

Порядок погружения фундаментов из винтовых свай в многолетнемерзлые грунты следующий:

- на начальном этапе выполняется проходка лидерной скважины диаметром меньше диаметра корпуса сваи;
- затем опускается свая на проектную отметку/глубину;
- внутренняя часть ствола сваи заполняется раствором.

Опускание винтовых свай происходит примерно в течение 20 минут и осуществляется в большей мере механизированным способом с использованием различных тяжелых автоматизированных машин, редко, в особых условиях, – ручным способом.

Ручной способ более трудозатратный, требует вовлечения в процесс людских ресурсов и используется в основном для свай малых диаметров: погружение сваи идет за счет завинчивания тела сваи в грунт ломом, пропущенным в сквозные отверстия ствола.

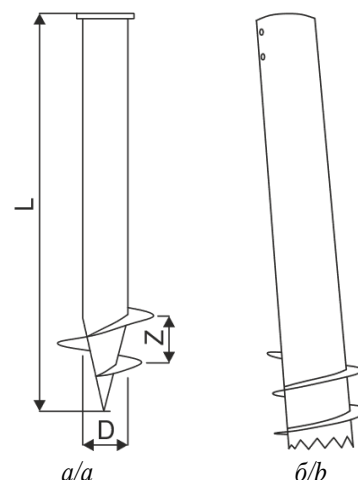


Рис. 1. Конструкция винтовой сваи: а) талые грунты; б) многолетнемерзлые грунты. L – длина, Z – шаг витка, D – диаметр трубы винтовой сваи [20]

Fig. 1. Design of the screw pile: а) thawed soils; б) permafrost soils. L is the length, Z is the turn pitch, D is the diameter of the screw pile pipe [20]

Недостатком свайных фундаментов является значительный расход металла и невозможность их применения в грунтах с твердыми прослойками и включениями крупнообломочных грунтов.

К преимуществам применения винтовых свай относятся: увеличение несущей способности на разные виды действующих нагрузок, стойкость к морозному пучению, возможность демонтировать для повторного использования, отсутствие вибрационного воздействия при погружении, сохранение природной структуры грунта, при погружении грунт не разрыхляется, а уплотняется, что увеличивает несущую способность [22].

Фактическая несущая способность свай определяется в ходе выполнения полевых натурных испытаний грунтов непосредственно на площадке строительства.

Испытания свай выполняются в соответствии с актуальными нормами, на основании рабочей документации марки «АС» («Архитектурно-строительные решения»), «КЖ» («Конструкции железобетонные»), «ОФ» («Основания и фундаменты»), в целях получения данных, необходимых для подтверждения принятых проектных решений, определения деформаций свай в грунте в зависимости от прилагаемой нагрузки и прослеживания их изменения во времени, а также для подтверждения проектных отметок остря и уточнения степени однородности грунтового массива [23–26].

Сущность испытаний свай заключается в последовательном увеличении нагрузок и измерении величин деформаций (осадок – вдавливающие нагрузки, выхода – выдергивающие нагрузки) свай.

В состав работ по испытаниям в ММГ статическими нагрузками входит:

- строительно-монтажные работы по устройству упорных конструкций, состоящих из грузовой платформы для вдавливающих нагрузок (рис. 2, а) или набора металлических балок при выдергивающих нагрузках (рис. 2, б), для восприятия реактивных сил при передаче нагрузок на сваю;
- установка реперной системы с измерительными приборами (рис. 3);
- укладка грузов (дорожные плиты, строительные блоки и т. д.);
- сбор системы передачи нагрузок – домкрат–манометр–маслостанция;
- передача ступенями требуемых нагрузок;
- снятие измерений;
- камеральная обработка результатов испытаний свай.



а/а



б/б

Рис. 2. Общий вид упорной конструкции при статических испытаниях свай: а) вдавливающие нагрузки (грузовая платформа); б) выдергивающие нагрузки (система балок)

Fig. 2. General view of the thrust structure during static testing of piles: а) pressing loads (cargo platform); б) pulling loads (beam system)

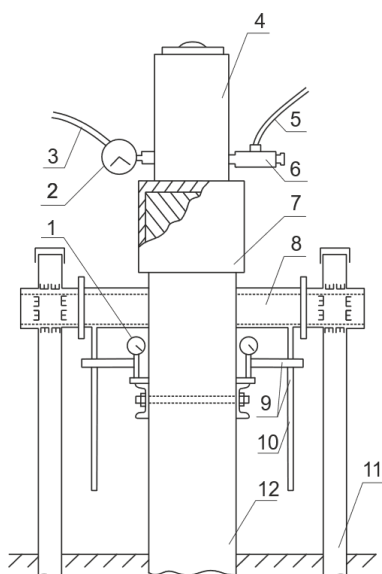


Рис. 3. Схема реперной системы: 1 – прибор для измерения деформаций; 2 – прибор для измерения давления; 4 – домкрат; 3, 5 – гибкий трубопровод; 6 – переходник; 7 – стальные пластины; 8, 11 – стальные опор и уголок; 9 – держатель для индикатора перемещений; 10 – прут металлический; 12 – контрольная свая [27]

Fig. 3. Scheme of the reference system: 1 – device for measuring deformations; 2 – pressure measuring device; 4 – jack; 3, 5 – flexible pipeline; 6 – adapter; 7 – steel plates; 8, 11 – steel supports and a corner; 9 – holder for a displacement indicator; 10 – metal rod; 12 – control pile [27]

**Инженерно-геокриологические условия
 исследуемой территории**

Объектом выполненного исследования является процесс взаимодействия фундаментов проектируемых локальных литотехнических систем в пределах обустройства нефтегазоносных провинций, выполненных из винтовых свай, с многолетнемерзлым основанием, на примере обустройства Бованенковского НГКМ.

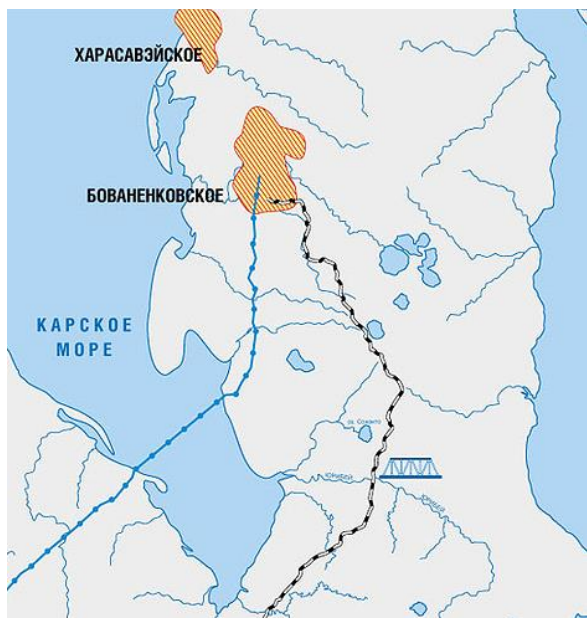


Рис. 4. Территориальное расположение Бованенковского месторождения [21]

Fig. 4. Territorial location of the Bovanenkovskoe field [21]

В административном отношении территория Бованенковского месторождения расположена в Ямальском районе Тюменской области, в западной части

полуострова Ямал, в нижнем течении рек Сё-Яха, Мордыяха и Надуй-Яха (рис. 4) [21].

Климат месторождения избыточно-влажный, с холодным летом и умеренно суровой зимой. По климатическому районированию изучаемый участок расположен в северной строительной климатической зоне с суровыми условиями, в IГ климатическом подрайоне, I2 климатическом районе по воздействию климата на технические изделия и материалы, во второй зоне влажности.

Территория находится в зоне сейсмичности 5,0 баллов по шкале MSK 64 карты сейсмического районирования России (ОСР 2015-В).

В геоморфологическом отношении территория проведения исследований представляет собой прибрежно-морскую равнину.

Особенностью изучаемой территории является практически сплошное распространение многолетнемерзлых, слоистых, неоднородных, двухярусного строения, с линзами льдов грунтов, льдистостью от 20 до 50 %, мерзлота сливающего типа.

Целостность толщ многолетнемерзлых грунтов прерывается таликами и криопэгами хлоридно-натриевого состава.

Глубина сезонного промерзания-оттаивания грунтов изменяется от 0,7 до 2,4 м.

Геокриологический разрез площадки строительства (рис. 5, 6, табл. 1), по результатам ранее выполненных изысканий, представлен насыпными грунтами (t_{IV}) – грунт разнородный, преимущественно песок разной крупности; почвенно-растительным слоем (pd_{IV}); современными биогенными отложениями (b_{IV}) – торф различной степени разложения; верхнеплейстоцен-голоценовыми морскими отложениями ($m_{III_{3,4}IV}$) – глины, суглинки, супеси, пески, линзы льдов [21].

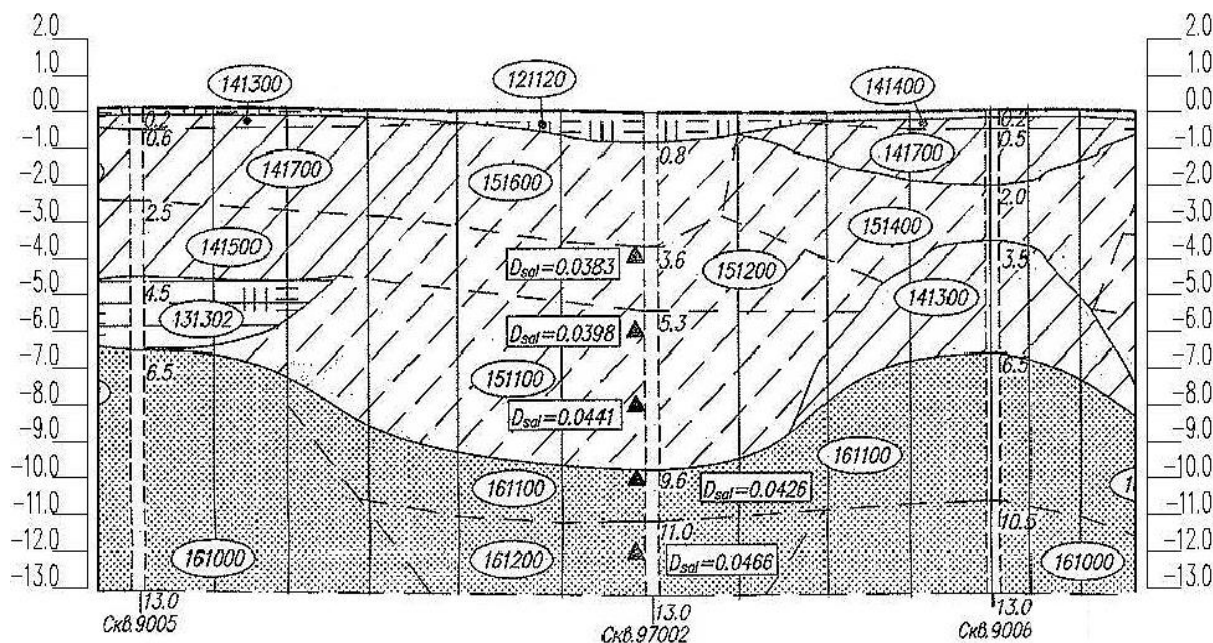


Рис. 5. Инженерно-геокриологический разрез по линии 1-1 [21]

Fig. 5. Geocryological engineering section along line 1-1 [21]

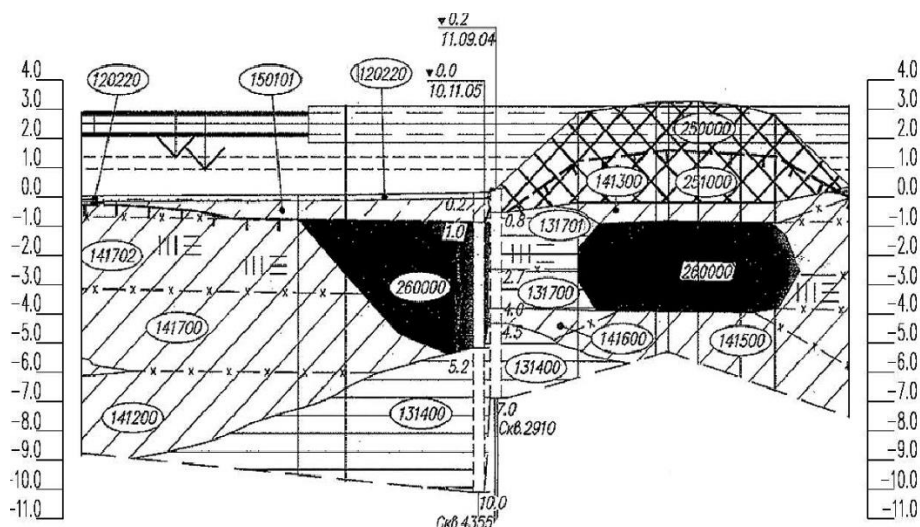


Рис. 6. Инженерно-геокриологический разрез по линии 2-2 [21]

Fig. 6. Geocryological engineering section along line 2-2 [21]

Таблица 1. Описание инженерно-геологических элементов (ИГЭ), представленных на инженерно-геологических разрезах

Table 1. Description of engineering-geological elements (IGE) presented on engineering-geological sections

Номер ИГЭ IGE number	Наименование грунта Soil name
120220	Горф водонасыщенный, среднеразложившийся/Medium decay saturated peat
121120	Горф мерзлый, среднеразложившийся/Peat frozen, medium-decomposed, $W_{tot}=1.0$, $\rho_f=0.95$, $i_i=0.40$
131302	Глина мерзлая, льдистая, слабозаторфованная/Frozen, icy, weakly clay, $W_{tot}=0.635$, $W_m=0.38$, $\rho_f=1.37$, $\rho_{df}=0.84$, $i_i=0.26$
131400	Глина мерзлая, льдистая/Frozen, icy clay, $W_{tot}=0.567$, $W_m=0.250$, $\rho_f=1.88$, $\rho_{df}=0.94$, $e_f=1.83$, $i_i=0.36$
131700	Глина мерзлая, очень сильнольдистая/Frozen clay, very strongly clayey, $W_{tot}=1.776$, $W_m=0.27$, $\rho_f=1.19$, $\rho_{df}=0.43$, $e_f=5.26$, $i_i=0.60$
131701	Глина мерзлая, очень сильнольдистая, с примесью органического вещества/Clay is frozen, very thickly clayey, with an admixture of organic matter, $W_{tot}=1.819$, $W_m=0.325$, $\rho_f=1.12$, $\rho_{df}=0.40$, $e_f=5.48$, $i_i=0.60$
141200	Суглинок мерзлый, слабольдистый/Frozen loam, weakly boggy, $W_{tot}=0.315$, $W_m=0.218$, $\rho_f=1.81$, $\rho_{df}=1.38$, $e_f=0.93$, $i_i=0.16$
141300	Суглинок мерзлый, льдистый/Frozen, icy loam, $W_{tot}=0.380$, $W_m=0.213$, $\rho_f=1.71$, $\rho_{df}=1.24$, $e_f=1.15$
141400	Суглинок мерзлый, льдистый/Frozen, icy loam, $W_{tot}=0.519$, $W_m=0.220$, $\rho_f=1.53$, $\rho_{df}=1.01$, $e_f=1.63$
141500	Суглинок мерзлый, сильнольдистый/Frozen loam, strongly alkaline, $W_{tot}=0.679$, $W_m=0.223$, $\rho_f=1.47$, $\rho_{df}=0.88$, $e_f=2.02$
141600	Суглинок мерзлый, сильнольдистый/Frozen loam, strongly alkaline, $W_{tot}=0.898$, $W_m=0.233$, $\rho_f=1.34$, $\rho_{df}=0.71$, $e_f=2.75$
141700	Суглинок мерзлый, очень сильнольдистый/Frozen loam, very strongly alkaline, $W_{tot}=1.575$, $W_m=0.227$, $\rho_f=1.22$, $\rho_{df}=0.47$, $i_i=0.60$
141702	Суглинок мерзлый, очень сильнольдистый, слабозаторфованный/Frozen loam, very strongly clayey, weakly clayey, $W_{tot}=2.236$, $W_m=0.364$, $\rho_f=1.20$, $\rho_{df}=0.37$, $e_f=5.89$, $i_i=0.60$
150101	Супесь пластичная, с примесью органических веществ/Plastic sandy loam, with an admixture of organic matter
151100	Супесь мерзлая, слабольдистая/Frozen loam, weak loam, $W_{tot}=0.243$, $W_m=0.206$, $\rho_f=1.92$, $\rho_{df}=1.55$, $e_f=0.72$
151200	Супесь мерзлая, слабольдистая/Frozen loam, weakly boggy, $W_{tot}=0.288$, $W_m=0.201$, $\rho_f=1.80$, $\rho_{df}=1.40$, $e_f=0.89$
151400	Супесь мерзлая, льдистая/Frozen loam, icy, $W_{tot}=0.489$, $W_m=0.204$, $\rho_f=1.67$, $\rho_{df}=1.12$, $e_f=1.37$, $i_i=0.35$
151600	Супесь мерзлая, сильнольдистая/Frozen sandy loam, strongly alkaline, $W_{tot}=0.854$, $W_m=0.215$, $\rho_f=1.41$, $\rho_{df}=0.76$, $i_i=0.54$
161000	Песок пылеватый, мерзлый, криотекстура массивная/Sand dusty, frozen, cryotexture massive, $W_{tot}=W_m=0.196$, $\rho_f=1.92$, $\rho_{df}=1.61$, $e_f=0.64$
161100	Песок пылеватый, мерзлый, слабольдистый/Sand dusty, frozen, weakly sandy, $W_{tot}=0.252$, $W_m=0.218$, $\rho_f=1.88$, $\rho_{df}=1.50$, $i_i=0.07$
161200	Песок пылеватый, мерзлый, слабольдистый/Sand dusty, frozen, weakly sandy, $W_{tot}=0.309$, $W_m=0.219$, $\rho_f=1.83$, $\rho_{df}=1.40$, $i_i=0.15$
250000, 251000	Насыпной грунт/Bulk soil
260000	Лед/Ice, $W_{tot}=1.0$, $\rho_f=0.90$

Примечание. W_m – влажность мерзлого грунта, расположенного между льдистыми включениями, д. е.; W_{tot} – суммарная влажность мерзлого грунта, д. е.; ρ_{df} – плотность мерзлого грунта в сухом состоянии, г/см³; ρ_f – плотность мерзлого грунта, г/см³; e_f – коэффициент пористости мерзлого грунта, д. е.; i_i – льдистость грунта за счет ледяных включений, д. е.

Note. W_m – moisture of frozen ground located between ice inclusions, e. g.; W_{tot} – total moisture of frozen ground, e. g.; ρ_{df} – density of frozen ground in dry state, g/cm³; ρ_f – density of frozen ground, g/cm³; e_f – porosity factor of frozen ground, e. g.; i_i – ice content of ground due to ice inclusions, e. g.

Грунты относятся к морскому типу засоленности, по степени засоленности от незасоленных до сильнозасоленных. По степени морозной пучинистости грунты среднепучинистые (суглинки, супеси, глины) и слабопучинистые (пески).

Подземные воды вскрыты на глубинах от 0,0 до 1,6 м. Воды надмерзлотного типа, безнапорные, функционирующие в летний период.

Из опасных геологических процессов выделяется пучение, заболачивание, наледообразование, морозобойное растрескивание, в меньшей степени торфонакопление.

Результаты полевых натурных испытаний грунтов

Полевые испытания грунтов проводились сваями винтовыми длиной 7,0 м, состоящими из труб диаметром 219 мм, изготовленными из стали марки 09Г2С, с литым наконечником диаметром 300 мм и узкими лопастями с углом наклона граней ребер 45 градусов (рис. 7).

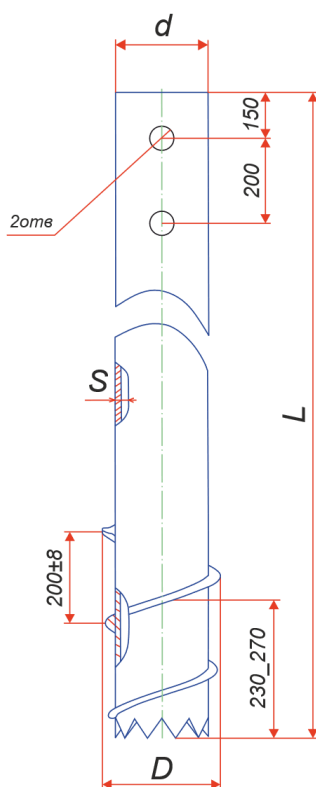


Рис. 7. Конструкция винтовой сваи с литым наконечником для многолетнемерзлых грунтов

Fig. 7. Construction of a screw pile with a cast tip for permafrost soils

Винтовые сваи погружались в многолетнемерзлый грунт в следующем порядке: на начальном этапе производилось бурение лидерной скважины шнеком диаметром 220 мм, затем свая завинчивалась до проектной глубины погружения, при этом монтажные отверстия, расположенные в верхней части сваи, заглушались металлическими пластинами 4×70×70, и в конце внутренняя полость сваи заполнялась бетоном.

Всего на исследуемой площадке было проведено 68 испытаний винтовых и буроопускных свай статическими вдавливающими и выдергивающими нагрузками, по 34 штуки каждого вида и по 17 каждого вида нагрузки. Буроопускные сваи имеют диаметр 219×8 и длину 7,0 м, с острием.

Результаты испытаний грунтов винтовыми сваями статическими вдавливающими и выдергивающими нагрузками в ММГ приведены в табл. 2, буроопускными сваями – в табл. 3.

Таблица 2. Результаты испытаний винтовых свай

Table 2. Results of testing screw piles with static loads

Номер сваи Pile number	Максимальная нагрузка при испытании, кН Maximum test load, kN	Суммарная осадка, мм Total settlement, mm	Максимальная нагрузка при испытании, кН Maximum test load, kN	Суммарный выход, мм Total displacement, mm
Статические вдавливающие нагрузки Static pressure loads		Статические выдергивающие нагрузки Static pulling loads		
1	200	0,93	275	28,02
2	200	1,82	275	25,66
3	200	1,01	250	25,20
4	200	3,80	275	26,63
5	200	1,46	250	25,34
6	450	1,81	275	28,59
7	300	0,66	400	25,50
8	500	2,38	900	25,10
9	500	2,27	400	2,56
10	500	0,83	600	25,04
11	500	1,51	700	25,06
12	500	1,01	600	2,67
13	500	1,40	500	25,28
14	800	2,72	450	25,12
15	500	1,12	500	25,12
16	500	1,12	450	25,70
17	500	2,30	800	25,33

Таблица 3. Результаты испытаний буроопускных свай

Table 3. Results of testing drilling piles with static loads

Номер сваи Pile number	Максимальная нагрузка при испытании, кН Maximum test load, kN	Суммарная осадка, мм Total settlement, mm	Максимальная нагрузка при испытании, кН Maximum test load, kN	Суммарный выход, мм Total displacement, mm
Статические вдавливающие нагрузки Static pressure loads		Статические выдергивающие нагрузки Static pulling loads		
1	300	1,54	200	1,79
2	300	1,64	200	1,90
3	300	1,69	200	1,26
4	360	1,85	200	1,46
5	360	1,92	360	2,39
6	360	1,77	360	1,32
7	360	1,65	360	1,02
8	360	1,58	360	1,69
9	360	1,90	360	1,01
10	162	2,02	330	1,07
11	162	2,55	330	1,12
12	162	2,13	330	1,01
13	162	2,25	288	1,13
14	162	2,29	288	2,02
15	384	1,05	288	2,13
16	384	1,22	288	1,88
17	300	1,88	288	1,94

Анализ математических методов определения предельного сопротивления винтовых свай в условиях Крайнего Севера

Расчетная нагрузка и предельное сопротивление свай по результатам испытаний в многолетнемерзлых грунтах рассчитываются в соответствии с ГОСТ 5686 и СП 25.13330.

СП 25.13330 не отображает методологию расчета предельного сопротивления винтовых свай по результатам полевых испытаний в условиях распространения криолитозоны.

На основе анализа отечественных литературных и научных ресурсов установлен ряд существующих методов расчета свайно-винтового фундамента на ММГ [25–30]:

- 1) методика ОАО «Фундаментпроект»;
- 2) методика ОАО «СевЗапНТЦ»;
- 3) метод, предложенный А.Д. Набережным (канд. техн. наук, зав. лабораторией инженерной геокриологии ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук»).

Вышеперечисленные методы представляют собой модификацию стандартной схемы расчета несущей способности свай в соответствии с СП 25.13330, но при этом включают в состав расчета характеристики конструкции наконечника – лопасти.

В 2016 г. рядом сотрудников ОАО «Фундаментпроект» разработана формула:

$$F_{d,du} = \gamma_t \gamma_c * (RA + R_{sh}A_{sh}),$$

где A_{sh} – площадь винтовой части, определяемая как $\pi D \times (h_v + D)$; D – диаметр лопасти; h_v – высота винтовой части; R_{sh} – расчётное сопротивление многолетнемерзлого грунта винтовой части; γ_c – коэффициент условий работы; γ_t – температурный коэффициент; R – расчётное давление на многолетнемерзлый грунт под нижним концом свай; A – площадь лопасти.

Суть данной схемы расчета состоит в учете лишь области в районе лопасти свай, т. е. системы «грунт около лопасти – сама лопасть – грунт под лопастью», при этом процесс смерзания тела свай с грунтом по боковой поверхности не рассматривается.

Разработчики данного способа вычисления полагают, что процесс смерзания ствола свай с окружающим грунтовым массивом непостоянен, довольно сложный, трудно управляемый и в большей степени лежит в основе предельной несущей способности свай.

ОАО «СевЗапНТЦ» в 2007 г. разработало внутренний проектный стандарт организации для электросетевого строительства – СТО 56947007-29.120.95-050-2010, в котором предложена следующая методика определения несущей способности фундамента из винтовых свай в условиях многолетнемерзлых грунтов:

$$F_{d,du} = \gamma_t \gamma_c (RA + R_{sh}A_{sh} + \gamma_{af} \sum R_{af} A_{af}),$$

где F_d – предельное сопротивление при действии вдавливающих сил; F_{du} – предельное сопротивление от влияния выдёргивающих сил; γ_{af} – коэффициент по

типу смерзания; R_{af} – расчётное сопротивление грунта в пределах выделенной области; A_{af} – площадь поверхности смерзания расчетного слоя с боковой поверхностью свай.

Отличительная черта выражения ОАО «СевЗапНТЦ» состоит в учете природы процесса смерзания грунта с боковой поверхностью свай и вида поверхности смерзания через коэффициент γ_{af} .

В 2018 г. в рамках исследований А.Д. Набережный предложил свою формулу:

$$F_u = \gamma_t \gamma_c (RA + \sum R_{sh,i} A_{sh,i} + \sum R_{peb,i} A_{peb,i} \cos \alpha),$$

где $R_{sh,i}$ и $A_{sh,i}$ – соответственно, сопротивление и площадь рассматриваемого слоя грунта; $R_{peb,i}$ – давление на грунт под гранью ребра; $A_{peb,i}$ – площадь опирания грани ребра; α – угол наклона ребер.

При выполнении математических вычислений А.Д. Набережный особое внимание уделяет шагу и углу наклона ребер лопасти винтовой свай.

Также в дополнение к выше рассмотренным методикам в исследовании учитывается формула, изложенная в СП 25.13330, без учета вида поверхности смерзания γ_{af} :

$$F_u = \gamma_t \gamma_c (R_B A_B + \sum (R_i A_i + R_{псв} A_{псв})),$$

где R_B и A_B – то же самое, что и R_{sh} и A_{sh} (формула ОАО «Фундаментпроект»); R_i и A_i аналогично R_{af} и A_{af} (формула ОАО «СевЗапНТЦ»); $R_{псв}$ и $A_{псв}$ аналогично R_{sh} и A_{sh} (формула ОАО «Фундаментпроект»).

Вышеописанная формула отличается от формулы ОАО «СевЗапНТЦ» неучетом γ_{af} и базируется на раздельном рассмотрении работы ствола и винта свай, при этом в расчете по боковой поверхности учитывается диаметр тела свай, а при расчетах под низом свай – диаметр лопасти.

Необходимо отметить, что при выполнении расчетов на статические выдергивающие нагрузки расчетное сопротивление многолетнемерзлого грунта под низом свай, т. е. под лопастью, будет равно нулю.

На фоне всего вышеизложенного и для подтверждения целесообразности использования винтовых фундамента в условиях криолитозоны проведен сравнительный анализ несущей способности в одинаковых геокриологических условиях с буропускными металлическими сваями с острием.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные результаты вычисления предельного сопротивления свайно-винтовых фундамента разными методами и сравнение с обычными буропускными металлическими сваями представлены в виде диаграмм (рис. 8, 9).

Предельное сопротивление свай получено на основе результатов контрольных испытаний грунтов. Испытания свай при выдергивающих нагрузках прекращались при достижении суммарного значения деформаций в 10 мм, а при сжимающих усилиях – до достижения значения максимальных нагрузок, принимаемых равными трехкратному значению расчетных проектных нагрузок.

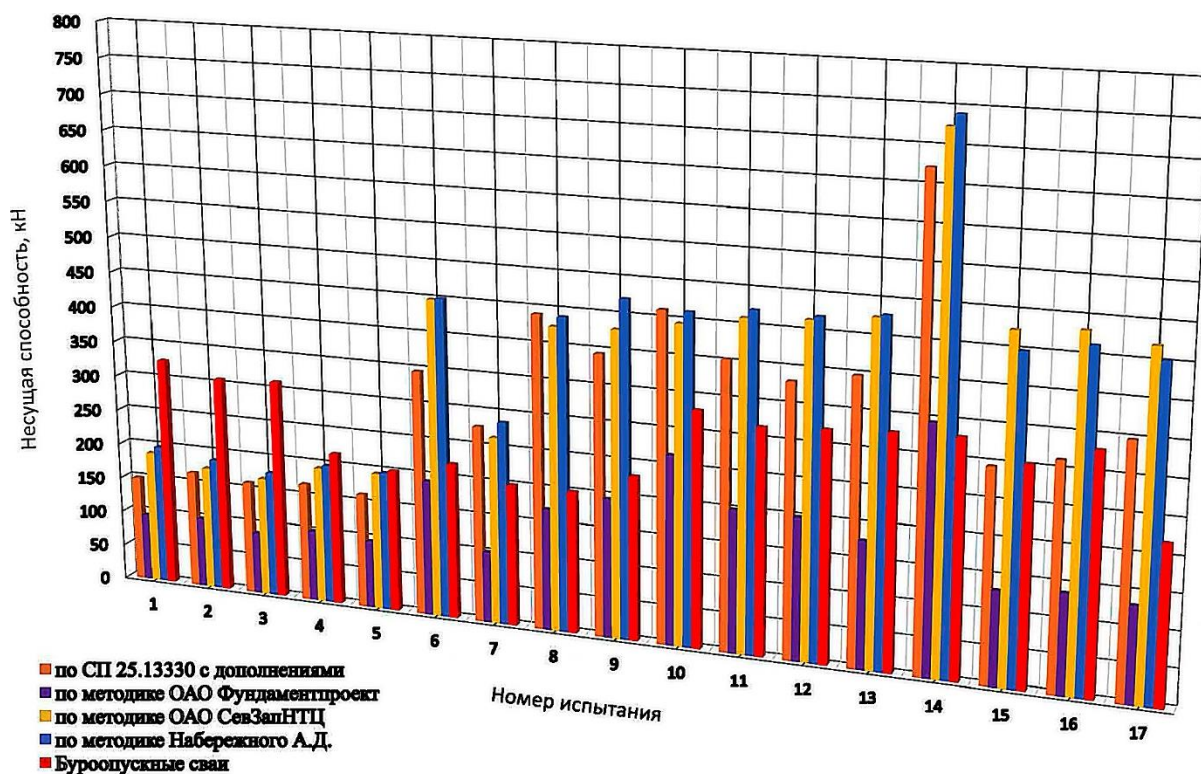


Рис. 8. Диаграмма сравнения несущей способности свай по результатам статических вдавливающих нагрузок
 Fig. 8. Comparison diagram of the bearing capacity of piles based on the results of static pressing loads

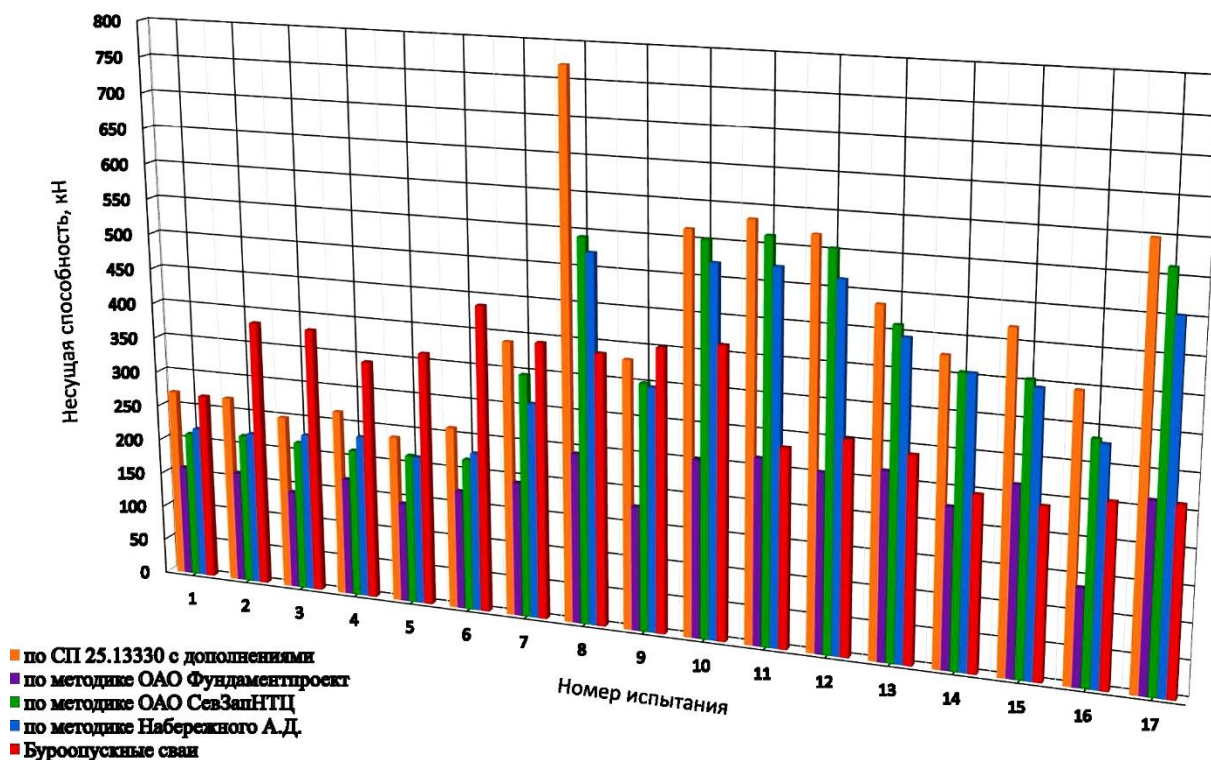


Рис. 9. Диаграмма сравнения несущей способности свай по результатам статических выдергивающих нагрузок
 Fig. 9. Comparison diagram of the bearing capacity of piles based on the results of static pulling loads

При этом каждую ступень нагружения выдерживали 24 часа без достижения условной стабилизации грунта, а в дальнейшем учитывался коэффициент краткосрочности испытаний равный 0,65.

При выдергивающих нагрузках на последней ступени нагружения (7-я ступень) в большинстве испытаний произошел срыв сваи, суммарный выход в течение первых 3–4 часов достигал 25 мм, следовательно-

но при этом условии в расчет принималась предыдущая степень нагружения.

При вдавливающих нагрузках наблюдались осадки свай от 1 до 4 мм, а также просматривалась условная стабилизация на 80 % испытаний на каждой ступени, хотя ее и не учитывали в расчетах.

Сооружения и здания с фундаментами из винтовых и буропускных свай расположены на расстоянии не более чем 100 м с идентичными геокриологическими условиями, погружение свай происходило в зимний период и с разницей не более 14 дней с момента погружения первой очереди.

Результаты расчетов винтовых свай при выдерживающих нагрузках по методике ОАО «Фундаментпроект» имеют меньшее значение, чем три другие методики, вследствие нерассмотрения смерзания грунта с телом сваи.

Расчеты ОАО «СевЗапНТЦ» и А.Д. Набережного дают близкие значения, но на 20–25 % меньше, чем по СП 25.13330, с учетом работы винтовой части и тела сваи как отдельного механизма.

При сжимающих нагрузках результаты ОАО «Фундаментпроект» также меньше, чем другие, а результаты ОАО «СевЗапНТЦ» и А.Д. Набережного сопоставимы между собой и больше на 25–30 %, чем по СП 25.13330 с дополнением.

Осредненные величины предельного сопротивления при различных видах нагрузки приведены в табл. 4.

Таблица 4. Среднее значение предельного сопротивления

Table 4. Average value of the limit resistance

Среднее значение несущей способности свай Average value of bearing capacity				
Винтовые/Screw				
по СП 25.13330 с дополнениями According to SP 25.13330 with additions	ОАО «Фундаментпроект» JSC «Fundamental Project»	ОАО «СевЗапНТЦ» JSC «SevZapNTC»	А.Д. Набережный A.D. Naberezhny	Буропускные Driven cast-in-situ pile
при выдерживающих нагрузках/with pulling loads				
405,5	199,8	368,6	356,4	332,1
при вдавливающих нагрузках/under pressure loads				
315,1	147,8	371,1	376,1	275,8

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frost jacking characteristics of screw piles in seasonally frozen regions based on thermo-mechanical simulations / T. Wang, J. Liu, B. Tai, C. Zang, Z. Zhang // Computers and Geotechnics. – 2017. – V. 91. – P. 27–38.
2. Эффективное снижение подъема свай при потеплении вечной мерзлоты / Д.В. Алявдин, В.М. Беляков, А.Д. Левин, А.Г. Алексеев, Э.С. Гречищева, О.В. Козлова, Р.В. Махота // Науки о земле. – 2022. – № 12. – № 9. – С. 313–325.
3. Трофименко Ю.В., Евгеньев Г.И., Шанина Е.В. Риски потери работоспособности автомобильных дорог в районах вечной мерзлоты из-за изменения климата // Процедура инженерия. – 2017. – № 189. – С. 258–264.
4. Popov S.N., Burenina O.N. Promising screw piles designs for construction on permafrost soils // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – V. 1079. – № 3. – P. 032003–032008.

Результаты, приведенные в табл. 4, показывают преимущество винтовых свай над буропускными: несущая способность винтовых больше, чем буропускных.

Сравнительный анализ несущей способности винтовых свай по отношению к буропускным в процентном содержании приведен в табл. 5.

Таблица 5. Сопоставление несущей способности винтовых и буропускных свай в аналогичных геокриологических условиях

Table 5. Comparison of the bearing capacity of screw and drill piles in similar geocryological conditions

По СП 25.13330 с дополнениями According to SP 25.13330 with additions	ОАО «Фундаментпроект» JSC «Fundamental Project»	ОАО «СевЗапНТЦ» JSC «SevZapNTC»	А.Д. Набережный A.D. Naberezhny
Процент отличия по отношению к буропускным при выдерживающих нагрузках Percentage of difference in relation to the driven cast-in-situ pile at pulling loads			
22	40	11	7
Процент отличия по отношению к буропускным при вдавливающих нагрузках Percentage of difference in relation to the driven cast-in-situ pile under pressure loads			
14	46	35	36

Заключение

Все вышерассмотренные методики применимы для расчета несущей способности винтовых свай в многолетнемерзлых грунтах.

Предельное сопротивление винтовых свай больше, чем у буропускных, на 20 % для выдерживающих нагрузок и на 33 % для сжимающих.

Описанные математические модели расчета винтовых свай в условиях криолитозоны и полученные результаты позволяют рассмотреть возможность их массового применения в качестве фундаментов при строительстве нефтегазоносных месторождений.

Точность расчетов винтовых свай по несущей способности зависит от учета всех их конструктивных особенностей, в частности размеров лопасти, геокриологических условий, при анализе совместной работы системы «свая–грунт».

5. A comparative analysis of foundation design solutions on permafrost soils / I. Inzhutov, V. Zhadanov, M. Semenov, S. Amelchugov, A. Klimov, P. Melnikov, N. Klinduh // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 110. – С. 01019–010028.
6. Application of pile foundations in structurally unstable soils / A. Alekseev, P. Sazonov, D. Zorin, S. Vinogradova // MATEC Web of Conferences. – 2019. – V. 265. – P. 05020–05031.
7. Andreeva A.V., Popov S.N., Savvinova M.E. Power Line Pylon for Installation in Heaving Permafrost Soil // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – V. 988. – № 5. – P. 052025–052035.
8. Effect of freeze–thaw cycles on the performance of cast-in-place piles in permafrost regions: working state and action effect sharing / R. Shi, Z. Wen, D. Li, Q. Gao, Y. Wei // Permafrost and Periglacial Processes. – 2022. – V. 33. – № 2. – P. 147–159.
9. Снижение устойчивости инфраструктуры российского топливно-энергетического комплекса в Арктике из-за повышения среднегодовой температуры поверхностного слоя криолитозоны / В.П. Мельников, В.И. Осипов, А.В. Брушков, С.В. Ба-

- дина, С.А. Великин, Д.С. Дроздов, Р.В. Чжан // Вестник Российской академии наук. – 2022. – Т. 92. – № 2. – С. 115–125.
10. Numerical simulation of the influence of pile geometry on the heat transfer process of foundation soil in permafrost regions / J. Zhang, Z. Zhang, S. Zhang, A. Brouchkov, C. Xie, S. Zhu // Case Studies in Thermal Engineering. – 2022. – V. 38. – P. 102324–102333.
 11. Influence of seasonal freezing-thawing soils on seismic performance of high-rise cap pile foundation in permafrost regions / J. Guan, X. Zhang, X. Chen, M. Ding, W. Wang, S. Yu // Cold Regions Science and Technology. – 2022. – V. 199. – P. 103581–103592.
 12. Impacts of permafrost degradation on infrastructure / J. Hjort, D. Streletskiy, G. Doré, Q. Wu, K. Bjella, M. Luoto // Nature Reviews Earth & Environment. – 2022. – V. 3. – № 1. – P. 24–38.
 13. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Forecast of the soil deformations and decrease of the bearing capacity of pile foundations operating in the cryolithozone // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2022. – V. 18. – № 1. – P. 141–150.
 14. Experimental study on thermal regime and frost jacking of pile foundation during operation period in permafrost regions / Y. Shang, F. Niu, J. Fang, L. Wu // Frontiers in Earth Science. – 2022. – V. 10. – P. 70–81.
 15. Строкова Л.А., Нечаев Д.А. Роль опасных геологических процессов при эксплуатации нефтепровода «Чаянда-ВСТО» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 86–98.
 16. Строкова Л.А. Распознавание геологических процессов в условиях вечной мерзлоты // Бюллетень инженерной геологии и окружающей среды. – 2019. – Т. 8. – № 78. – С. 5517–5530.
 17. A nonlinear approach for time dependent settlement analysis of a single pile and pile groups / S. Feng, X. Li, F. Jiang, L. Lei, Z. Chen // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2017. – V. 54. – № 1. – P. 7–16.
 18. Aziz H.Y., Maula B.H. Estimation of negative skin friction in deep pile foundation using the practical and theoretically approaches // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – V. 13. – № 10. – P. 3340–3349.
 19. Bjerrum L. Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils // Soil Mechanics and Foundation Engineering: Proc. of the 8th International Conference. – Moscow, 1973. – № 3. – P. 111–159.
 20. Особенности работы винтовых свай в мерзлых грунтах / В.И. Аксёнов, С.Г. Геворкян, А.В. Иоспа, Д.Н. Кривов, И.В. Шмелёв, С.И. Спиридонов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2014. – № 4. – С. 2–8.
 21. Басмулин В.В., Аксёнов В.И., Дубиков Г.И. Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала. Т. II. Геокриологические условия освоения Бованенковского месторождения. – Тюмень: ИПОС СО РАН, 1996. – 240 с.
 22. Губко Г.Л. Конструктивные и технологические решения фундаментов из лопастных свай в многолетнемерзлых грунтах // Вестник науки и образования. – 2018. – № 9. – С. 52–58.
 23. Долматов Б.И., Лапшин Ф.К. Оценка несущей способности свай при массовом их применении // Совещание-семинар по обмену опытом проектирования и возведения свайных фундаментов. – М.: Трест «Оргсельстрой», 1966. – С. 2–6.
 24. Кургузов К.В., Фоменко И.К., Сироткина О.Н. Оценка несущей способности свай. Методы расчета и проблематика // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 10. – С. 7–25.
 25. Нормы проектирования фундаментов из винтовых свай № 20007ТМ. Т. 1. Кн. 1. – СПб.: СевЗапНТИЦ, 2007. – 53 с.
 26. ГОСТ 5686-2020. Грунты. Методы полевых испытаний сваями. – М.: Стандартиформ, 2021. – 57 с.
 27. Руководство по проектированию оснований и фундаментов на вечномерзлых грунтах. НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. – М.: Стройиздат, 1980. – 303 с.
 28. Руководство по эффективным способам устройства свайных фундаментов на вечномерзлых грунтах в нефтегазовом строительстве. – М.: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, ИКЦ ПФ, 2005. – 166 с.
 29. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – М.: Стандартиформ, 2020. – 110 с.
 30. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Высшая школа, 1973. – 448 с.

Поступила 03.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 21.11.2022 г.

Информация об авторах

Кулешов А.П., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры инженерной геологии Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

Николенко И.А., магистрант кафедры инженерной геологии Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

Горлов А.А., студент кафедры инженерной геологии Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

UDC 624.131

DETERMINATION OF THE BEARING CAPACITY OF A PILE-SCREW FOUNDATION IN A CRYOLITHOZONE

Alexander P. Kuleshov¹,
87kuleshov@mail.ru

Irina A. Nikolenko¹,
qwnwhalle@bk.ru

Andrey A. Gorlov¹,
andrey.gor10@yandex.ru

¹ Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University,
23, Miklukho-Maklay street, Moscow, 117997, Russia.

The relevance of the study lies in the problem of calculating the bearing capacity of pile-screw foundations in the conditions of cryolithozone propagation under the influence of static pulling and pressing loads. Pile-screw foundations are a fairly new type in construction, although the first mention of them dates back to the late XVIII – early XIX centuries. This technology has proven itself from the best side. In recent years, screw piles have gained wide popularity in the construction of various facilities, but still occupy a relatively small share in foundation construction. The potential of this technology is poorly disclosed, the definition of load-bearing capacity in domestic standards is not regulated.

Objective: to analyze the existing methods and develop recommendations for calculating the bearing capacity of pile-screw foundations in cryolithozone conditions, comparing the results of calculations of the ultimate resistances of this type of foundation obtained by various methods with full-scale field tests and drilling piles.

Methods: systematization, analysis of domestic and foreign experience in calculating screw piles in the areas of permafrost distribution; collection and processing of materials for field testing of soils with screw piles in the area of arrangement of the Bovanenkovskoe field; performing calculations of bearing capacity by various methods and comparing the results with data from field tests and drilling piles; description of the methodology for conducting field tests of piles in the conditions of the cryolithozone.

Results. The authors have carried out the calculations of the bearing capacity of screw piles under cryolithozone conditions by various methods described in the literature and their comparison with the data of field tests of soils, a comparative assessment of the bearing capacity of screw piles with metal drill piles with a tip in the same geocryological conditions, revealed the advantages and disadvantages of the methods considered and various types of pile foundations. Based on the results obtained, conclusions are drawn about the possibility of using screw piles in cryolithozones and obtaining the necessary and sufficient information for their design.

Key words:

pile-screw foundations, cryolithozone, full-scale field tests, bearing capacity, static loads, settlement, outlet, lateral surface, tip, blade, calculation methods, comparative analysis, permissible load, soil temperature.

REFERENCES

1. Wang T., Liu J., Tai B., Zang C., Zhang Z. Frost jacking characteristics of screw piles in seasonally frozen regions based on thermo-mechanical simulations. *Computers and Geotechnics*, 2017, vol. 91, pp. 27–38.
2. Alyavdin D., Belyakov V., Levin A., Alekseev A., Grechishcheva E., Kozlova O., Makhota R. Reline jacket: efficient reduction of frost-heave uplift of piles in warming permafrost. *Geosciences*, 2022, vol. 12, no. 9, pp. 313–325. In Rus.
3. Trofimenko Y.V., Evgenev G.I., Shashina E.V. Functional loss risks of highways in permafrost areas due to climate change. *Procedia engineering*, 2017, vol. 189, pp. 258–264. In Rus.
4. Popov S.N., Burenina O.N. Promising screw piles designs for construction on permafrost soils. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1079, no. 3, pp. 032003–032008.
5. Inzhutov I., Zhadanov V., Semenov M., Amelchugov S., Klimov A., Melnikov P., Klinduh N. A comparative analysis of foundation design solutions on permafrost soils. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 110, pp. 01019–010028.
6. Alekseev A., Sazonov P., Zorin D., Vinogradova S. Application of pile foundations in structurally unstable soils. *MATEC Web of Conferences*, 2019, vol. 265, pp. 05020–05031.
7. Andreeva A.V., Popov S.N., Savvinova M.E. Power line pylon for installation in heaving permafrost soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 988, no. 5, pp. 052025–052035.
8. Shi R., Wen Z., Li D., Gao Q., Wei Y. Effect of freeze–thaw cycles on the performance of cast-in-place piles in permafrost regions: working state and action effect sharing. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2022, vol. 33, no. 2, pp. 147–159.
9. Mel'nikov V.P., Osipov V.I., Brushkov A.V., Badina S.V., Velikin S.A., Drozdov D.S., Chzhan R.V. Decreased stability of the infrastructure of Russia's fuel and energy complex in the Arctic because of the increased annual average temperature of the surface layer of the cryolithozone. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2022, vol. 92, no. 2, pp. 115–125. In Rus.
10. Zhang J., Zhang Z., Zhang S., Brouchkov A., Xie C., Zhu S. Numerical simulation of the influence of pile geometry on the heat transfer process of foundation soil in permafrost regions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, vol. 38, pp. 102324–102333.
11. Guan J., Zhang X., Chen X., Ding M., Wang W., Yu S. Influence of seasonal freezing–thawing soils on seismic performance of high-rise cap pile foundation in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, vol. 199, pp. 103581–103592.
12. Hjort J., Streletskiy D., Doré G., Wu Q., Bjella K., Luoto M. Impacts of permafrost degradation on infrastructure. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, vol. 3, no. 1, pp. 24–38.
13. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Forecast of the soil deformations and decrease of the bearing capacity of pile foundations operating in the cryolithozone. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2022, vol. 18, no. 1, pp. 141–150.
14. Shang Y., Niu F., Fang J., Wu L. Experimental study on thermal regime and frost jacking of pile foundation during operation period in permafrost regions. *Frontiers in Earth Science*, 2022, vol. 10, pp. 70–81.
15. Strokova L.A., Nechaev D.A. Role of hazardous geological processes in the operation of the Chayanda-ESPO oil pipeline.

- Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 86–98. In Rus.
16. Strokova L. Recognition of geological processes in permafrost conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 8, no. 78, pp. 5517–5530. In Rus.
 17. Feng S., Li X., Jiang F., Lei L., Chen Z. A nonlinear approach for time dependent settlement analysis of a single pile and pile groups. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2017, vol. 54, no. 1, pp. 7–16.
 18. Aziz H.Y., Maula B.H. Estimation of negative skin friction in deep pile foundation using the practical and theoretically approaches. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, no. 10, pp. 3340–3349.
 19. Bjerrum L. Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering. Proc. of the 8th International Conference*. Moscow, 1973. No. 3, pp. 111–159.
 20. Aksenov V.I., Gevorkyan S.G., Iospa A.V., Krivov D.N., Shmelev I.V., Spiridonov S.I. Features of the work of screw piles in frozen soils. *Foundations, foundations and mechanics of soils*, 2014, no. 4, pp. 2–8. In Rus.
 21. Baulin V.V., Aksenov V.I., Dubikov G.I. *Inzhenerno-geologicheskoy monitoring promyslov Yamala. T. II. Geokriologicheskoye usloviya osvoeniya Bovanenkovskogo mestorozhdeniya* [Engineering and geological monitoring of Yamal fisheries. Geocryological conditions for the development of the Bovanenkovskoe field]. Tyumen, IPOS SB RAS Publ., 1996. Vol. 2. 240 p.
 22. Gubko G.L. Constructive and technology solutions of the bases from bladed piles in permafrost soil. *Bulletin of Science and education*, 2018, no. 9, pp. 52–58. In Rus.
 23. Dolmatov B.I., Lapshin F.K. Otsenka nesushchey sposobnosti svay pri massovom ikh primenenii [Evaluation of the bearing capacity of piles for mass application]. *Soveshchanie-seminar po obmenu opytom projektirovaniya i vozdeystviya svaynykh fundamentov* [Meeting seminar on the exchange of experience in the design and erection of pile foundations]. Moscow, Orgselstroy Trust Publ., 1966. pp. 2–6.
 24. Kurguzov K.V., Fomenko I.K., Sirotkina O.N. Assessment of the bearing capacity of piles. Calculation methods and problems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 10, pp. 7–25. In Rus.
 25. *Normy projektirovaniya fundamentov iz vintovykh svay. Metody rascheta i problematika* [Standards for the design of foundations from screw piles no. 20007TM]. St. Petersburg, SevZap STC, 2007. 53 p.
 26. GOST 5686-2020. *Grunty. Matody polevykh ispytany svayami* [Soils. Methods of field testing with piles]. Moscow, StandardInform Publ., 2021. 57 p.
 27. *Rukovodstvo po projektirovaniyu osnovany i fundamentov na vechnomerzlykh gruntakh. NIIOSP im. N.M. Gersevanova* [Guidelines for the design of foundations and foundations on permafrost soils. NIIOSP named after N.M. Gersevanov]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980. 303 p.
 28. *Rukovodstvo po effektivnym sposobam ustroystva svaynykh fundamentov na vechnomerzlykh gruntakh v neftyanom stroitelstve. NIIOSP im. N.M. Gersevanova* [Guide to effective ways of installing pile foundations on permafrost soils in oil and gas construction / NIIOSP named after N.M. Gersevanov]. Moscow, ICTS PF Publ., 2005. 166 p.
 29. SP 25.13330.2020. *Osnovaniya i fundamente na vechnomerzlykh gruntakh* [Foundations and foundations on permafrost soils]. Moscow, StandardInform Publ., 2020. 110 p.
 30. Tsytoovich N.A. *Mekhanika merzlykh gruntov* [Mechanics of frozen soils]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973. 448 p.

Received: 3 November 2022.
Reviewed: 21 November 2022.

Information about the authors

Alexander P. Kuleshov, Cand. Sc., associate professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

Irina A. Nikolenko, master's student, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

Andrey A. Gorlov, student, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.