

УДК 624.131

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СТАНДАРТНЫХ И УСКОРЕННЫХ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Николенко Ирина Александровна¹,
qwnwhalle@bk.ru

Кулешов Александр Петрович¹,
87kuleshov@mail.ru

Строкова Людмила Александровна²,
sla@tpu.ru

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

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы состоит в анализе результатов полевых контрольных испытаний грунтов статической нагрузкой на вдавливание натурными сваями, выполненными по ускоренной и стандартной методикам в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов. Сроки проведения испытаний грунтов сваями позволяют корректировать и ускорять темпы строительно-монтажных работ по устройству «нулевого цикла» фундаментов, сокращать время на принятие различных конструктивных решений и возведение технических систем, направленных на обеспечение механической безопасности проектируемых сооружений в части создания и поддержания требуемого температурно-прочностного режима грунтов оснований (термостабилизация грунтов) и дальнейшего его контроля в ходе строительства и эксплуатации зданий и сооружений (геотехнический мониторинг). В работе проанализированы два метода расчета, приведен анализ по рациональной области использования каждого метода.

Цель: вычисление и сопоставление расчетных нагрузок, полученных в ходе производства статических испытаний на вдавливание сваи в грунт, на основе требований регламентируемых и существующих методик измерений (стандартной и ускоренной) в условиях криолитозоны и оценка возможности применения того или иного способа расчета.

Методы. На первом этапе исследования рассмотрены вопросы организации и технологии производства полевых контрольных испытаний свай в северо-западной части Амурской области посредством оценки информации, отображенной в отчетственной нормативной документации: СП 25.13330.2020 и ГОСТ 5686-2020. Описаны инженерно-геокриологические условия территории проведения работ. На втором этапе выполнена оценка 11-ти полевых испытаний, проведены расчеты и сравнительный анализ несущей способности и расчетных нагрузок на сваи по результатам испытаний.

Результаты. Полученные данные рекомендуется использовать при строительстве зданий и сооружений на свайных фундаментах в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов для контроля и оперативного управления темпами возведения нулевого цикла фундаментов, для оценки экономической составляющей проекта и получения достоверных и необходимых данных о состоянии геологической среды.

Ключевые слова:

несущая способность, рабочая испытываемая свая, сопоставимые испытания грунтов сваями, сравнительный анализ, полевые испытания, деформации, грунт многолетнемерзлый, температурный режим, расчетная нагрузка, основание, свайные фундаменты.

Введение

Газовая отрасль занимает важное место в экономике нашей страны, в связи с чем на протяжении нескольких десятилетий идет масштабное обустройство многих месторождений и строительство инфраструктуры для транспортировки газа. Одним из стратегически приоритетных в настоящее время направлений является рынок Китая, для нужд которого реализуется проект «Сила Сибири» [1–12]. Этот газопровод – стратегически важная и крупнейшая система транспортировки газа на Востоке России, строительство которого идет ускоренными темпами ведущими строительными компаниями. В настоящее время заканчивается строительство второй ветки (2 этап) газопровода.

Строительные работы, как и любой производственный процесс, не проходит гладко, тем более, когда территория работ довольно отдалена от крупных городских агломераций, расположена в суровых кли-

матических условиях, имеет сложное геологическое, гидрогеологическое и тектоническое строение, а также не имеет нужной инфраструктуры (транспортной, производственной, бытовой и т. д.). Все перечисленные причины, а также человеческий фактор, который не является главным, приводят к отставанию от графика сдачи объекта в эксплуатацию, увеличению сроков строительства и экономическим издержкам.

На фоне всех возможных возникающих трудностей строители совместно с изыскателями и проектировщиками при любой возможности пытаются ускорить процесс обустройства территории – процесс строительно-монтажных и проектно-изыскательских работ.

Первая стадия строительства начинается с проведения изысканий и проектирования объекта, а заканчивается возведением фундамента зданий и сооружений с системами по обеспечению надежного его

функционирования. В основном в качестве фундаментов в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов применяются металлические и железобетонные сваи разного диаметра и длины [13–19].

На начальном этапе строительства происходит погружение нескольких пробных свай для выполнения натуральных испытаний в соответствии с действующими нормами и правилами. Это выполняется с целью проверки геологического разреза, достоверности принятых параметров свай (длина, диаметр, материал) под фундамент и соответствия несущей способности расчетным проектным нагрузкам.

Положительные результаты испытаний дают возможность приступить к массовому погружению свайного поля, в противном случае необходимо будет корректировать проектные решения и проводить замену свай с одними параметрами на другие или увеличивать их число.

Производство работ по испытанию свай должно выполняться с соблюдением действующих «Правил техники безопасности» и требований, приведенных в соответствующих разделах ГОСТ 5686-2020, СП 25.13330.2020 [20, 21].

Контрольные статические испытания на вдавливание выполняются для определения расчетного сопротивления свай.

Суть испытаний состоит в увеличении нагрузок на натурные сваи, передаваемых в соответствии с заранее установленными ступенями – 1/10 от максимальной нагрузки, которая равна трехкратной величине проектной нагрузки, и измерении на каждой ступени перемещения (осадки).

Для испытаний свай на вдавливание в многолетнемерзлых грунтах рекомендуется применять установку в виде грузовой платформы или набора балок [22–26].

Работы по испытанию одиночных свай в составе фундаментов жилых, гражданских и промышленных сооружений вдавливающей нагрузкой на основании раздела 9 ГОСТ 5686-2020 производятся по двум методикам: динамометрическая (ускоренная) и стандартная.

Отличительной чертой этих двух методов является время их проведения в части проектно-изыскательских работ: для стандартных испытаний – 170 часов, для ускоренных – 34 часа.

Установка для проведения вдавливающих испытаний состоит из следующих основных элементов: упорная конструкция (платформа); гидравлический домкрат, устанавливаемый на голову сваи, покрытую наголовником; тарированный груз (металлические «чушки», железобетонные блоки и плиты, металлические балки, рельсы, мешки с песком, цементов); реперная система с аппаратурой для измерения перемещений испытываемой сваи; рычаги (обычно два) для устранения перекосов платформы и обеспечения центральной передачи нагрузки.

Натурные испытания многолетнемерзлых грунтов начинаются после достижения расчетной проектной температуры грунтов. Фактическая температура измеряется в термотрубке или термоскважине с помо-

щью термометрических кос и определяется как среднее арифметическое значение без учета мощности слоя сезонного промерзания–оттаивания [20].

При производстве испытаний в зимний период мерзлый грунт вокруг испытываемой сваи на глубину сезонного промерзания–оттаивания удаляется и заменяется на сухие опилки, песок, шлак или же выполняется более трудоёмкий процесс – парооттаивание. Если заблаговременно известны места испытаний, то до наступления морозов рекомендуется утеплить грунт у голов забитых свай: укладка опилок, увеличение снежного покрова и т. п.

В процессе испытания сваи непосредственно на месте работ заполняется «Журнал статических испытаний» и для контроля хода испытания вычерчивается график зависимости осадки от нагрузки $S=f(P)$.

Инженерно-геокриологическая характеристика участка

В административном отношении площадка проведения испытаний свай расположена в северо-западной части Амурской области, на территории Сковородинского района, неподалеку от поселка Невер.

В геоморфологическом отношении участок работ находится у подножия хребта Ильтивус, занимает территорию выположенного склона долины р. Большой Невер. Понижение рельефа наблюдается с севера на юг с уклоном 2–5°. Абсолютные отметки изменяются от 499,54 до 519,41 м. Перепад высот составляет 19,87 м. Рельеф эрозионно-денудационный [15].

Рассматриваемый район относится к умеренному климатическому поясу с муссонным климатом.

Согласно физико-географическому районированию объект находится в пределах Амуро-Зейской горнокотловинной области возвышенных равнин Амуро-Сахалинской физико-географической страны, на Приамурской равнине.

Характерной особенностью исследуемой территории является распространение «островной» и сплошной многолетней мерзлоты сливающегося и не сливающегося типов.

Инженерно-геокриологический разрез изучаемой территории до глубины 20,0 м по ранее проведенным ООО «ИПИГАЗ» изысканиям представлен комплексом различных стратиграфо-генетических комплексов: сверху залегают отложения биогенного и техногенного происхождения, подстилаемые верхнеплейстоценовыми элювиально-делювиальными и аллювиальными отложениями.

Биогенные отложения представлены торфом среднеразложившимся, твердомерзлым; техногенные – насыпным песком; элювиально-делювиальные – крупнообломочным грунтом с суглинистым и супесчаным заполнителем, суглинками и супесями с примесью органического вещества, слабозаторфованными, с различным количеством обломочного материала.

В некоторых местах описываемого участка в многолетнемерзлых породах отмечены прослои и линзы подземного льда мощностью от нескольких сантиметров до 1–2 м. Приурочены прослои и линзы обычно к верхним горизонтам мерзлых пород, чаще всего к слоям суглинков, особенно пылеватых.

Таблица 1. Характеристики инженерно-геологических элементов

Table 1. Characteristics of engineering-geological elements

Номер слоя и ИГЭ Layer number and IGE	Наименование грунта Name of the soil
Талые грунты/Thawed soils	
110000	Почвенно-растительный слой/Topsoil
251000	Насыпной грунт: щебенистый грунт с песчаным и супесчаным заполнителем, tQ _{IV} Filled soil: crushed stone soil with sandy and sandy loam aggregate
140120	Суглинок легкий; полутвердый; щебенистый 25 до 50 %/Lean stiff clay with cobbles 25...50 %; W=0,192; W _L =0,278; W _p =0,179; I _p =0,099; I _L =0,131; ρ _s =2,68; ρ=2,07; ρ _d =1,74; e=0,54; S _r =0,95; ε _{th} =7,4; D _{sal} =0,022; c _n =0,042; φ _n =26; E=27; R ₀ =0,27
140210	Суглинок легкий; тугопластичный; со щебнем от 15 до 25 %/Lean firm-stiff clay with cobbles 15...25 %; W=0,217; W _L =0,282; W _p =0,182; I _p =0,100; I _L =0,350; ρ _s =2,70; ρ=2,07; ρ _d =1,70; e=0,59; S _r =0,99; ε _{th} =8,8; D _{sal} =0,023; c _n =0,032; φ _n =23; E=26; R ₀ =0,23
210210	Древесянный грунт водонасыщенный/Silty fine gravel saturated W=0,245; W _L =0,266; W _p =0,170; I _p =0,096; I _L =0,780 ρ _s =2,70; ρ=1,95; ρ _d =1,57; e=0,719; S _r =0,92; c _n =0,07; φ _n =39; E=43; R ₀ =0,50
Мерзлые грунты/Frozen soils	
110000	Почвенно-растительный слой/Topsoil
121020	Торф мерзлый (льдиность < 0,45); криотекстура слоистая; среднеразложившийся/Frozen peat (iciness < 0,45); cryotexture layered; medium-decomposed W _{tot} =1,97; ρ _s =1,97; ρ _f =1,11; ρ _d =0,37; i _i =0,39; I _L =0,80; D _{dp} =33; λ _{th} =0,93; λ _f =1,39; C _{th} =3,78; C _f =2,73; δ=0,01-0,1; ε _{th} >10,0
141000	Суглинок мерзлый; нельдистый; криотекстура массивная; незасоленный/Lean clay frozen; not icy; the cryotexture is massive; unsalted; W _{tot} =0,184; W _m =0,184; p _f =2,01; p _s =2,70; p _d =1,70; e _f =0,59; S _r =1,00; W _L =0,290; W _p =0,181; I _p =0,109; (I _L =0,028); i _i =0,00; D _{sal} =0,019; δ=0,0; T _{bf} =-0,2; C _{th} =2,85; C _f =2,09; λ _{th} =1,20; λ _f =1,64; m _f =0,07; E=11,1; A _{th} =0,025; m=0,065; C _{eq} =0,117; R _{af} =0,067; t=-0,5; R _{af(-0,5)}} =0,069; t=-0,5; R _{af(-0,8)}} =0,070
141100	Суглинок мерзлый; слабольдистый; криотекстура слоистая/Lean clay frozen; slightly icy; cryotexture layered W _{tot} =0,266; W _L =0,282; W _p =0,175; I _p =0,107; I _L =0,85; ρ _s =2,71; ρ _f =1,83; ρ _d =1,45; e _f =0,87; i _i =0,10; W _m =0,205; S _r =1,00; i _{tot} =0,227; λ _{th} =1,44; λ _f =1,68; C _{th} =3,00; C _f =2,10; m _f =0,062; A _{th} =0,043; m=0,072; C _{eq} =0,137; t=-1,0; R _{af} =0,063; t=-0,5; R _{af(-0,5)}} =0,064; R _{af(-0,8)}} =0,065; R _{af(-3,0)}} =0,155; T _{bf} =-0,18; ε _{th} =9,0
141110	Суглинок мерзлый; слабольдистый; криотекстура массивная с включениями щебня (галечки) от 15 до 25 %/Lean clay frozen; slightly icy; the cryotexture is massive; with cobbles 15...25 % W _{tot} =0,165; W _L =0,273; W _p =0,170; I _p =0,103; I _L =0,11; ρ _s =2,71; ρ _f =2,06; ρ _d =1,74; e _f =0,645; i _i =0,151; W _m =0,205; S _r =0,52; i _{tot} =0,27; λ _{th} =1,48; λ _f =1,66; C _{th} =2,68; C _f =2,26; ε _{th} =6,6; R _{af} =0,066; t=-0,5; R _{af(-0,5)}} =0,066; R _{af(-0,8)}} =0,067; R _{af(-3,0)}} =0,158
141111	Суглинок мерзлый; слабольдистый; криотекстура массивная; с включениями щебня (галечки) от 15 до 25 %; с примесью органического вещества/Lean clay frozen; slightly icy; the cryotexture is massive; with cobbles 15...25 % and organic matter W _{tot} =0,343; W _L =0,285; W _p =0,190; I _p =0,098; I _L =1,61; ρ _s =2,68; ρ _f =1,88; ρ _d =1,40; e _f =0,91; i _i =0,18; W _m =0,220; S _r =1,00; I _L =0,08; i _{tot} =0,360; λ _{th} =1,41; λ _f =1,59; C _{th} =2,998; C _f =2,15; T _{bf} =-0,30; ε _{th} =7,0-10,0; A _{th} =0,188; m=0,313; C _{eq} =0,466; R _c =0,551; t=-1,0; R _{af} =0,060; t=-0,5; R _{af(-0,5)}} =0,062; R _{af(-0,8)}} =0,065; R _{af(-3,0)}} =0,173
141120	Суглинок щебенистый (галечниковый) мерзлый слабольдистый криотекстура массивная/Lean clay frozen; slightly icy; the cryotexture is massive; with cobbles W _{tot} =0,217; W _L =0,272; W _p =0,170; I _p =0,102; I _L =0,461; ρ _s =2,70; ρ _f =2,10; ρ _d =1,73; e _f =0,56; i _i =0,03; W _m =0,200; S _r =1,00; i _{tot} =0,22; λ _{th} =1,33; λ _f =1,75; C _{th} =2,73; C _f =2,07; ε _{th} =8,2; m _f =0,277; E=2,89; C _{eq} =0,033; R _{af} =0,072; t=-0,5; R _{af(-0,5)}} =0,062; R _{af(-0,8)}} =0,066; R _{af(-3,0)}} =0,156
141220	Суглинок щебенистый (галечниковый); мерзлый; льдистый; криотекстура массивная/Lean clay frozen; icy; the cryotexture is massive; with cobbles W _{tot} =0,493; W _L =0,272; W _p =0,193; I _p =0,079; I _L =3,79; ρ _s =2,67; ρ _f =2,03; ρ _d =1,36; e _f =0,96; i _i =0,33; W _m =0,223; S _r =1,00; i _{tot} =0,56; λ _{th} =0,49; λ _f =0,63; C _{th} =2,62; C _f =2,25; δ=0,14; ε _{th} =7,0-10,0; R _{af} =0,055; t=-0,5; R _{af(-0,5)}} =0,056; R _{af(-0,8)}} =0,058; R _{af(-3,0)}} =0,149
151100	Супесь мерзлая, слабольдистая, криотекстура слоистая/Silty clay frozen, slightly icy, the cryotexture is layered W _{tot} =0,225; W _L =0,249; W _p =0,188; I _p =0,06; I _L =0,61; ρ _s =2,66; ρ _f =1,94; ρ _d =1,58; e _f =0,68; i _i =0,06; W _m =0,114 S _r =0,68; i _{tot} =0,20; λ _{th} =1,81; λ _f =1,93; C _{th} =2,96; C _f =2,34; δ=0,20; ε _{th} >7,0; R _{af} =0,071; t=-0,5; R _{af(-0,5)}} =0,075 R _{af(-0,8)}} =0,079; R _{af(-3,0)}} =0,17
221010	Щебенистый грунт мерзлый, слабольдистый/Crushed cobbles frozen, slightly icy W _{tot} =0,161; W _L =0,238; W _p =0,158; I _p =0,08; I _L =0,04; ρ _s =2,70; ρ _f =2,054 ρ _d =1,774 e _f =0,53; i _i =0,092; W _m =0,161; S _r =0,90; i _{tot} =0,32; λ _{th} =2,24; λ _f =1,72; C _{th} =3,02; C _f =2,07; A _{th} =0,04; m=0,040, ε _{th} =0,7

Примечание. Основные буквенные обозначения величин: W – естественная влажность, д. е.; W_m – влажность мерзлого грунта, расположенного между льдистыми включениями, д. е.; W_{tot} – суммарная влажность мерзлого грунта, д. е.; W_L – влажность грунта на границе текучести, д. е.; W_p – влажность грунта на границе раскатывания, д. е.; I_p – число пластичности, д. е.; I_L – показатель текучести, д. е.; ρ_s – плотность частиц грунта, г/см³; ρ_df – плотность мерзлого грунта в сухом состоянии, г/см³; ρ – плотность грунта, г/см³; ρ_f – плотность мерзлого грунта, г/см³; ρ_d – плотность талого грунта в сухом состоянии, г/см³; e_f – коэффициент пористости мерзлого грунта, д. е.; e – коэффициент пористости, д. е.; i_i – льдистость грунта за счет ледяных включений, д. е.; i_{tot} – суммарная льдистость, д. е.; S_r – коэффициент водонасыщения, д. е.; I – относительное содержание органического вещества, д. е.; D_{dp} – степень разложения торфа, %; R_c – предел прочности на одноосное сжатие, МПа; R₀ – расчетное сопротивление грунта, МПа; ε_{th} – относительная деформация пучения, %; E – модуль деформации, МПа; c_n – удельное сцепление (рекомендуемое), МПа; φ_n – угол внутреннего трения (рекомендуемое), град; K_f – коэффициент истираемости, д. е.; K_{wr} – коэффициент выветрелости, д. е.; I, II, III – категория просадочности мерзлого грунта при оттаивании.
 Note. The main letter designations of the values are: W – natural moisture; W_m – moisture of frozen soil located between ice inclusions; W_{tot} – total moisture of frozen soil; W_L – liquid limit; W_p – plastic limit; I_p – plasticity index; I_L – liquidity index; ρ_s – density of solid particles, g/cm³; ρ_df – dry density of frozen soil, g/cm³; ρ – density of soil, g/cm³; ρ_f – density of frozen soil, g/cm³; ρ_d – dry density of thawed soil, g/cm³; e_f – void ratio of frozen soil; e – void ratio; i_i – iciness of the soil due to ice inclusions; i_{tot} – total iciness; S_r – degree of saturation; I_r – relative content of organic matter; D_{dp} – degree of decomposition of peat, %; R_c – uniaxial compressive strength, MPa; R₀ – calculated soil resistance, MPa; e_f – relative heave deformation, %; E – modulus of deformation, MPa; c_n – specific cohesion (recommended), MPa; φ_n – angle of internal friction (recommended), deg; K_f – coefficient of abrasion; K_{wr} – coefficient of weathering; I, II, III – category of subsidence frozen ground during thawing.

Расчетная глубина сезонного промерзания для глинистых грунтов равна 3,10 м, крупнообломочных грунтов – 4,70 м.

Нормативная глубина сезонного оттаивания для торфа – 0,80 м, супесей и суглинков изменяется от 2,0 до 3,5 м, в крупнообломочных грунтах – 4,0 м.

На исследованном участке к специфическим грунтам отнесены органоминеральные и органические грунты, а также техногенные грунты.

Гидрография рассматриваемого участка работ представлена бассейном реки Амур.

Сейсмичность площадки строительства оценивается в 7 баллов.

По сложности инженерно-геологических условий территории классифицируется как сложная.

На территории проведения работ выделено два слоя, четыре инженерно-геологических элемента (ИГЭ) для талых и восемь ИГЭ мерзлых грунтов. Характеристики физико-механических свойств, выделенных ИГЭ, приведены в табл. 1.

Грунтовые воды на площадке вскрыты на глубинах от 2,0 до 12,0 м. Воды безнапорные, водовмещающими породами являются щебенистые и дресвяные грунты, а также суглинки и супеси с различным содержанием крупнообломочного материала. Основным источником питания горизонта являются атмосферные осадки. Направление грунтового потока и разгрузка подземных вод осуществляется в сторону реки Б. Невер.

На поверхности земли повсеместно наблюдаются опасные процессы и явления, связанные с промерзанием и оттаиванием мерзлых грунтов – морозобойные трещины, наледеобразование, бугры пучения, солифлюкция. На территории происходит повсеместное заболачивание.

Рабочей документацией предусмотрено строительство по I принципу в условиях вечной мерзлоты, т. е. с дальнейшим сохранением природного состояния многолетнемерзлых пород как в процессе строительства, так и в течение всего периода эксплуатации. Для обеспечения требуемого температурного режима грунтов основания и несущей способности свай на весь период эксплуатации сооружения проектом предусматривается установка вертикальных термостабилизаторов грунта (ТСГ).

Результаты контрольных исследований грунтов натурными сваями

Основным объектом изучения является несколько зданий повышенного и нормального уровня ответственности, расположенных в одинаковых инженерно-геокриологических условиях (участки со сплошной мерзлотой): здание лабораторного корпуса, канализационная насосная станция очищенных стоков, канализационная насосная станция бытовых стоков, блок-бокс котельной, эстакады под коммуникации, канализационная насосная станция промстоков, блочно-комплектная трансформаторная подстанция, здание контрольно-пропускного пункта и станция подготовки питьевой воды.

В качестве фундамента приняты буропускные металлические сваи диаметром 219 мм длиной 12,0 м,

с острием 0,35 м, погруженные с применением лидерных скважин диаметром 320 мм. Испытания статическими вдавливающими нагрузками производились в соответствии с требованиями и указаниями ГОСТ 5686-2020.

Нагружение свай при испытании на вдавливание производили отдельными ступенями: для стандартных первые три ступени равны 1/5 и далее 1/10 от максимальной нагрузки (рис. 1), для ускоренных – 1/8 (рис. 2). Величина ступени принималась на протяжении всего опыта постоянной и контролировалась по показаниям на манометре точных измерений (класс точности 0,6).

Значение давления, передаваемого домкратом на испытываемую сваю, на манометре фиксировалось исходя из предварительных математических расчетов, основанных на учете площади поперечного сечения и силы штока гидроцилиндра.

За максимальную нагрузку принимали нагрузку, превышающую проектную в 3,0 раза при стандартных испытаниях и в 4–5 для ускоренных.

К испытаниям приступали только после достижения грунтами требуемого проектом температурного режима, равного минус 0,3 °С.

Испытание свай заканчивалось при достижении максимальной нагрузки. Если суммарная осадка достигала значения в 25,0 мм, то наступал «срыв» свай и испытание прекращалось.

После каждой ступени нагрузки на сваю отсчеты по приборам снимались в следующей последовательности:

- при стандартном опыте – первый отсчет сразу после передачи нагрузки, затем через интервалы времени в 0,5–1–2–4–8–16–24 часов;
- при ускоренном опыте – первый и второй отсчеты перед и после нагружения соответственно, затем последовательно в течение часа через каждые 15 минут 4 отсчета и далее через каждые 60 минут до окончания ступени нагружения.

Разгрузку испытываемой сваи проводили ступенями с наблюдением за упругой деформацией грунтов. За значение давления на 3-й и 5-й ступенях разгрузки принимали величину давления, равную при этих же ступенях в ходе нагрузки, следующие ступени вдвое больше, чем при нагрузке.

За критерий условной стабилизации при ускоренных испытаниях принимали скорость снижения нагрузки, равную 0,02 от нагрузки на предыдущей ступени за последние 4 часа наблюдений.

Суммарное время проведения опыта для одной сваи составляло 170 часов при стандартных испытаниях и 34 часа при ускоренных.

До начала опыта и после его окончания выполнялись замеры температуры грунтов. Суммарное время выдержки термометрической косы составляло 12 часов.

Величина измеренной температуры грунтов на глубине нулевых годовых колебаний температур изменяется от минус 0,4 до минус 0,7 °С.

Процесс с изменением нагрузки и взятием отсчетов по измерительным приборам при статических испытаниях велся непрерывно от начала до оконча-

ния опыта, при этом обеспечивалось постоянство давления на манометре за счет своевременной подкачки масла при необходимости – 1 подкачка в 30 минут.



Рис. 1. Испытание грунтов сваей стандартным методом

Fig. 1. Soil testing with a pile by standard method



Рис. 2. Испытание грунтов сваей ускоренным методом

Fig. 2. Soil testing with a pile by accelerated method

Камеральная обработка результатов контрольных испытаний в многолетнемерзлых грунтах базировалась на основе выполнения условия: $F \leq F_u / \gamma_n$ (F – проектная предельная величина нагрузки на основание; F_u – несущая способность, полученная в ходе натурального опыта; γ_n – коэффициент надежности) с учётом рекомендаций ГОСТ 5686-2020 и СП 25.13330.2020.

Несущая способность сваи F_u по результатам полевых испытаний определялась как:

$$F_u = \gamma_t * k * \frac{F_{u,n}}{\gamma_g},$$

где k – коэффициент, учитывающий различие в условиях работы опытной и проектируемой сваи; $F_{u,n}$ – предельно длительное сопротивление сваи; γ_g – коэффициент надежности по грунту.

Предельно длительное сопротивление $F_{u,n}$ вычисляли по формуле:

$$F_{u,n} = \gamma_t * \gamma_c * (RA + \sum_{i=1}^n R_{af,i} A_{af,i}),$$

где γ_t и γ_c – коэффициенты температурный и условий работы соответственно; R – расчетное сопротивление грунта в основании сваи; A – площадь сваи; $R_{af,i}$ и $A_{af,i}$ – расчетное сопротивление грунта по боковой поверхности смерзания сваи и площадь смерзания в пределах расчетного слоя соответственно; n – количество расчетных слоев грунта.

Значение несущей способности сваи рассчитывалось без учета мощности слоя сезонного промерзания-оттаивания (СМС-СТС).

При расчете несущей способности учитывали дополнительные коэффициенты: 0,9 (территория попадает в зону сейсмичности 7 баллов) и 0,65 (кратковременность испытания).

В обработке использовали всего 22 испытания свай, выполненные различными методиками – по 11 штук для каждой на 11 сооружениях, т. е. как минимум по 1 свае каждой методикой для каждого из рассматриваемых участков.

Территория для выполнения опытных работ имела размеры 300×300 м, инженерно-геокриологические условия для каждого здания и сооружения сопоставимы.

Интерпретация результатов испытаний, полученных различными методиками, отображена в табл. 2.

Частное значение предельно длительного сопротивления сваи по результату испытания с динамометрическим нагружением определяли в результате построения графика $P=f(T)$ как значение нагрузки на последней ступени, при которой наступает условная стабилизация нагрузки, т. е. ее относительное постоянство [19] (рис. 3).

За частное значение предельно длительного сопротивления сваи по результату стандартного испытания многолетнемерзлых грунтов свай принимали величину передаваемой наибольшей нагрузки с коэффициентом 0,65, учитывающим кратковременность испытания – 7 суток (рис. 4).

Таблица 2. Сводная таблица результатов ускоренных и стандартных испытаний мерзлых грунтов сваями на вдавливающую нагрузку

Table 2. Summary table of the results of accelerated and standard tests of frozen soils with piles for a pressing load

Свая/Pile							
Номер/Number	Максимальная нагрузка при испытании, кН Maximum test load, kN	Нормативное значение предельно длительного сопротивления, кН Normative value of the extremely long resistance, kN	Суммарная осадка, мм Total settlement, mm	Несущая способность, кН, для T °C грунта Bearing capacity, kN, for T °C of the soil		Расчетная нагрузка, кН Estimated load, kN	
				При испытании During the test	По расчету (п.7.2-7.6) СП 25.13330 By calculation (p.7.2-7.6) SP 25.13330	по испытаниям by the tests	по проекту by the project
Ускоренное испытание/Accelerated test							
1у	400	260	0,85	344,36	281,38	158	90
2у	300	195	0,77	517,40	494,46	139	75
3у	420	273	0,86	301,26	301,26	203	105
4у	556	361	0,64	1213,15	931,28	206	139
5у	400	260	0,97	254,75	214,59	163	75
6у	400	260	0,72	241,11	205,08	164	87
7у	680	442	2,08	1021,66	865,91	279	170
8у	800	520	2,62	452,71	378,84	324	170
9у	400	260	1,13	409,78	368,06	174	99
10у	1000	650	2,03	1243,92	878,69	312	250
11у	580	377	0,83	320,39	300,21	263	145
Стандартное испытание/Standard test							
1с	360	234	1,04	318,70	255,95	140	120
2с	470	306	2,39	587,97	532,12	206	157
3с	370	370	0,85	306,37	278,41	163	123
4с	435	283	0,75	396,69	367,30	195	145
5с	300	195	6,15	812,65	685,99	122	99
6с	258	168	1,32	463,65	420,44	113	86
7с	750	488	0,97	549,75	441,76	291	250
8с	450	293	1,27	343,00	300,55	191	150
9с	450	293	0,73	256,50	249,35	211	150
10с	600	390	1,69	433,18	405,02	271	170
11с	600	390	1,87	1021,66	865,91	246	170

Сравнительный анализ полученных результатов

Итог всей исследовательской работы состоял в сравнении и анализе результатов камеральной обработки несущей способности свай, полученной в ходе выполнения натуральных испытаний по стандартной и ускоренной методикам для многолетнемерзлых грунтов.

Сводная табл. 2 показывает, что осредненная величина осадки свай при ускоренных испытаниях равна 1,23 мм, а для стандартных – 1,73 мм, ошибка по среднему значению – 29 %.

Величины средних значений нагрузок на свайные фундаменты, полученные в результате натуральных контрольных испытаний грунтов сваями, при ускоренных больше, чем при стандартных, ошибка – 10 %: 217 кН > 195 кН (рис. 5).

Следует отметить, что в сравнительном анализе участвовали сваи, одинаковые по длине и по диаметру.

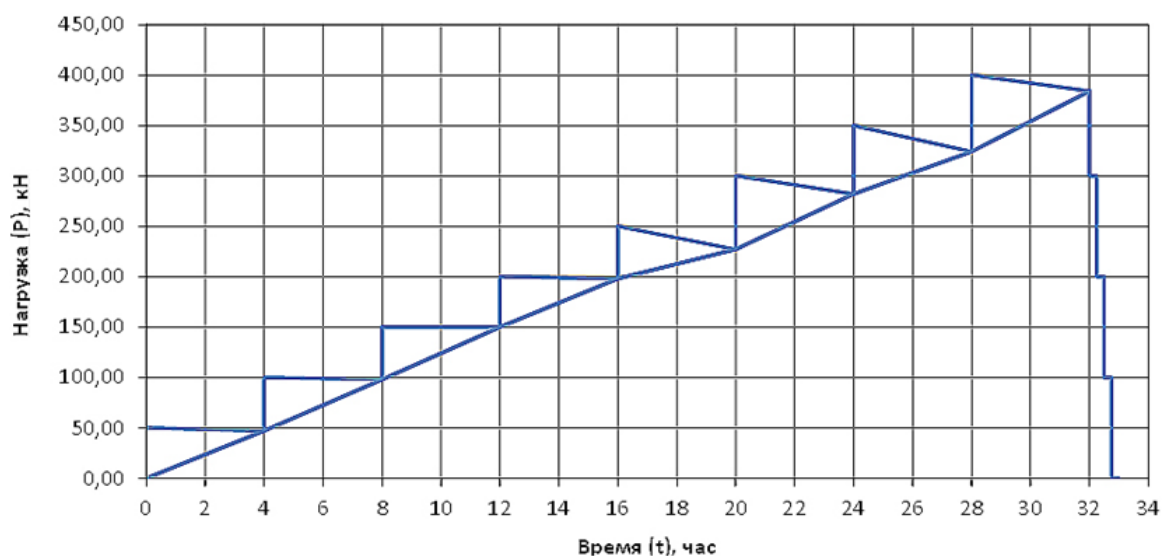


Рис. 3. График изменения нагрузки (P) во времени (t) при испытании ускоренным методом для сваи № 1
 Fig. 3. Graph of load change (P) in time (t) during accelerated testing for pile no. 1

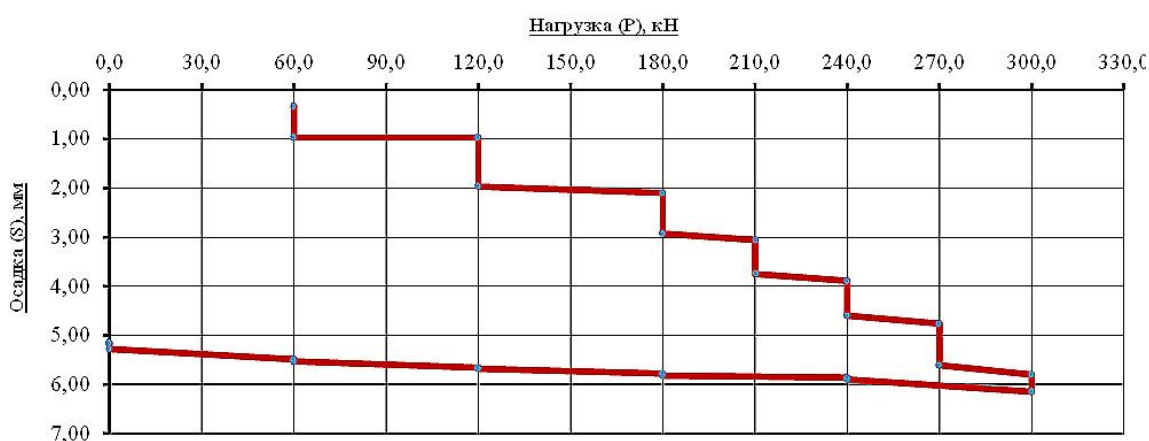


Рис. 4. График изменения осадки (S) от нагрузки (P) при испытании стандартным методом для сваи № 5с
 Fig. 4. Graph of the change in settlement (S) from load (P) when tested by the standard method for pile no. 5с

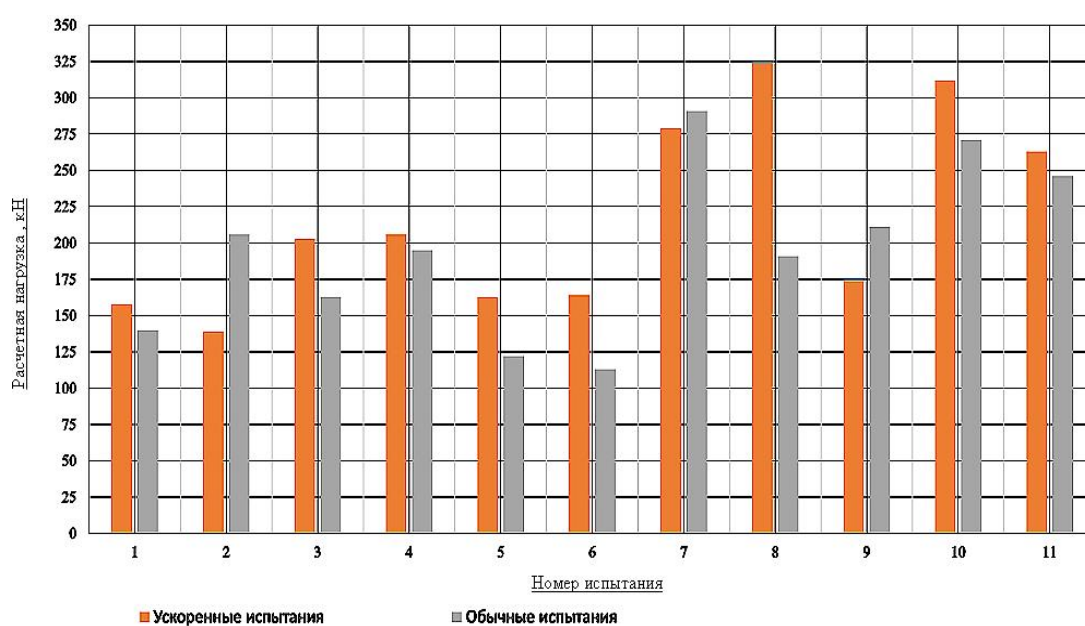


Рис. 5. Диаграмма изменения расчетной нагрузки по результатам полевых испытаний
 Fig. 5. Diagram of the calculated load change based on the results of field tests

Динамометрические испытания значительно сокращают время выполнения опыта и, следовательно, ускоряют процесс получения необходимой разрешительной документации для дальнейшего массового погружения всего свайного основания и ведения строительно-монтажных работ верхних конструкций.

Однако данные испытания не отражают действительности природы процесса взаимодействия системы «мерзлое основание – фундамент» по причине специфических свойств, характерных для многолетнемерзлых грунтов, а именно быстрое нагружение на мерзлые грунты приводит к увеличению их «мгновенной» прочности, в то время как при длительном процессе наблюдаются свойства ползучести.

Следовательно, время, отведенное на выдержку каждой ступени нагружения испытываемой сваи, – 4 часа, будет не слишком мало для оценки несущей способности.

Еще одним из важных требований при выполнении ускоренных испытаний является выполнение рекомендаций, описанных в пункте Р.4 приложения Р ГОСТ 5686-2020, а именно: «Нагрузка при испытании должна быть доведена до конечного значения, которая оказывается практически постоянной на последних трех ступенях нагружения» [20 и др.].

Анализируя данное требование, можно сделать вывод, что максимальная нагрузка, принятая в ходе проведения опытов и равная от 250 до 1000 кН, в 3–4 раза больше проектной (75–250 кН) и явно недостаточна, так как постоянство нагрузки на последних ступенях не соблюдается.

Следовательно, для получения достоверной информации о несущей способности свай, соответствующей требованиям нормативной документации, за величину максимальной нагрузки следует принимать большее значение, чем принято в ходе выполнения опытов.

Данный вывод подтверждается результатами ускоренных испытаний, проведенных на территории села Мыс Каменный в Ямальском районе Ямало-Ненецкого автономного округа на объектах линейной части в составе напорного нефтепровода (крановые узлы, балочные переходы, подвижные опоры, прожекторные мачты): так, для балочного перехода проектная нагрузка – 57 кН, при испытаниях – 400 кН, т. е. в 7 раз больше проектной, что является достаточной величиной для проведения опыта в соответствии со всеми требованиями (рис. 6).

Для сравнения выявлялись участки со средней температурой грунта в диапазоне от $-0,3$ до $-0,7$ °С, такие же как на исследуемом участке, и преобладание многолетнемерзлых грунтов сплошного распространения сливающего и не сливающего типов, сложенных пре-

имущественно суглинистыми грунтами с прослоями супесей и включением обломочного материала.

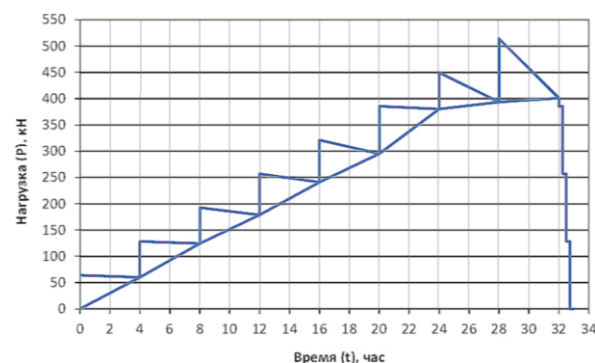


Рис. 6. График изменения нагрузки (P) на сваю во времени (t) при испытании ускоренным методом на территории села Мыс Каменный

Fig. 6. Graph of the load change (P) on the pile in time (t) when tested by the accelerated method on the territory of the village Mys Kamenny

При этом для выполнения требования пункта Р.4 ГОСТ 5686-2020 – конечное значение нагрузки на последних трех ступенях нагружения практически постоянное, необходимо большее количество пригруза, т. е. в 7 раз больше, чем проектная нагрузка, при динамометрических испытаниях, что с точки зрения охраны труда небезопасно.

С экономической точки зрения стоимость выполнения строительно-монтажных работ на подготовительном этапе (погрузочно-разгрузочные работы, количество пригруза), необходимых для проведения стандартных испытаний, больше в 2,7 раза, чем при ускоренных, в части изыскательских работ разница в стоимости для стандартных в 1,2 раза больше.

Предварительный вывод по результатам анализа показывает существенное экономическое расхождение в методиках проведения испытаний свай, а также малую достоверность несущей способности свай при ускоренных испытаниях в связи с природой мерзлых грунтов и их поведением под различными видами нагрузок (длительные или краткосрочные).

Эффективность ускоренной методики также вызывает сомнение по причине проведения большого комплекса подготовительных работ для достижения необходимого фактического характера нагрузок на сваю.

Несмотря на то, что данная методика регламентирована нормативными документами (ГОСТ 5686-2020) с рядом оговорок, ее использование рекомендовали бы лишь для предварительной оценки несущей способности свайных фундаментов в ходе строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
 6. 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.
 7. Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Природные особенности строительства участка газопровода «Сила Сибири» на участке Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение – Ленск // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 41–55.
 8. Strokova L. Recognition of geological processes in permafrost conditions // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2019. – V. 78. – Iss. 8. – P. 5517–5530.
 9. Улицкий В.М., Шашкин А.Г. Геотехническое сопровождение реконструкции городов. – М.: Изд-во АСВ, 1999. – 327 с.
 10. 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. – Iss. 1. – P. 7–16.
 11. 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.
 12. 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. – V. 3. – P. 111–159.
 13. Григорян А.А. Расчет несущей способности свай // *Проблемы свайного фундаментостроения: Труды VI международной конференции*. – М., 1998. – Т. 1 – С. 37–42.
 14. 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., 1966. – С. 2–6.
 15. Кулешов А.П., Пендин В.В. Влияние методики определения свойств грунтов в численных расчетах деформаций // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 12. – С. 63–74.
 16. 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.
 17. Кургузов К.В., Фоменко И.К. Сравнение методик расчета несущей способности свай // *Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ): Материалы Международной научно-практической конференции*. – М., 2018. – Т. 2. – С. 254–255.
 18. Пендин В.В. Комплексный количественный анализ информации в инженерной геологии. – М.: КДУ, 2009. – 350 с.
 19. Пилигин А.В. Проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений. 3-е изд., переработанное и дополненное. – М.: Изд-во АСВ, 2017. – 398 с.
 20. ГОСТ 5686-2020. Грунты. Методы полевых испытаний сваями. – М.: Стандартинформ, 2021. – 57 с.
 21. ГОСТ 25358-2020. Грунты. Метод полевого определения температуры. – М.: Стандартинформ, 2021. – 17 с.
 22. Руководство по проектированию оснований и фундаментов на вечномерзлых грунтах. НИИОСП им. Н.М. Герсевича. – М.: Стройиздат, 1980. – 303 с.
 23. Руководство по проектированию свайных фундаментов. НИИОСП им. Н.М. Герсевича. – М.: Стройиздат, 1980. – 151 с.
 24. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 138 с.
 25. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. – М.: Стандартинформ, 2016. – 69 с.
 26. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – М.: Стандартинформ, 2020. – 110 с.

Поступила 31.10.2022 г.

Дата рецензирования: 21.01.2023 г.

Информация об авторах

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

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

Строкова Л.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 624.131

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF STANDARD AND ACCELERATED FIELD TESTS OF PILE FOUNDATIONS IN PERMAFROST SOILS

Irina A. Nikolenko¹,
qwnwhalle@bk.ru

Alexander P. Kuleshov¹,
87kuleshov@mail.ru

Lyudmila A. Stroková²,
sla@tpu.ru

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

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the work consists in the analysis of the results of field control tests of soils with a static load on indentation with full-scale piles, performed according to accelerated and standard methods in conditions of permafrost spreading. The timing of soil testing by piles allows you to adjust and accelerate the pace of construction and installation work on the device of the «zero cycle» of foundations, reduce the time for making various design decisions and erecting technical systems aimed at ensuring the mechanical safety of the designed structures in terms of creating and maintaining the required temperature and strength regime of the foundation soils (thermal stabilization of soils) and its further control during the construction and operation of buildings and structures (geotechnical monitoring). The paper analyzes two calculation methods, provides an analysis of the rational use of each method.

Objective: calculation and comparison of design loads treated during the production of static tests for pressing piles into the ground, based on the requirements of regulated and existing measurement methods (standard and accelerated) in cryolithozone conditions and assessment of the possibility of using one or another calculation method.

Methods. At the first stage of the study, the issues of organization and technology of production of field control tests of piles in the north-western part of the Amur region were considered by evaluating the information displayed in the domestic regulatory documentation: SP 25.13330.2020 and SS 5686-2020. The engineering and geocryological conditions of the work area are described. At the second stage, an assessment of 11 field tests was carried out, calculations and comparative analysis of the bearing capacity and design loads on piles were carried out according to the test results.

Results. The obtained data are recommended to be used in the construction of buildings and structures on pile foundations in conditions of the spread of permafrost soils for monitoring and operational management of the pace of construction of the «zero cycle» of foundations, for assessing the economic component of the project and obtaining reliable and necessary data on the state of the geological environment.

Key words:

bearing capacity, working tested pile, comparable soil tests with piles, comparative analysis, field tests, deformations, permafrost soil, temperature regime, design load, foundation, pile foundations.

REFERENCES

- Zhang J., Zhang Z., Zhang S., Brouckov 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, 102324.
- 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, 103581.
- 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 (1), pp. 24–38.
- 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 (1), pp. 141–150.
- 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.
- Stroková 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.
- Stroková L.A., Ermolaeva A.V. Natural features of construction of the main gas pipeline «The Power of Siberia» on a site Chayandinskoe oil and gasfield – Lensk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 41–55. In Rus.
- Stroková L. Recognition of geological processes in permafrost conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, Iss. 8, pp. 5517–5530
- Ulitsky B. M., Shashkin A. G. *Geotekhnicheskoe soprovozhdenie rekonstruktsii gorodov* [Geotechnical support urban renewal]. Moscow, DIA Publ., 1999. 327 p.
- 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 (1), pp. 7–16.
- 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 (10), pp. 3340–3349.
- 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. Vol. 3, pp. 111–159.
- Grigoryan A.A. Raschet nesushchey sposobnosti svay [Calculation of bearing capacity of piles]. *Problemy svaynogo fundamentostroeniya. Trudy VI Mezhdunarodnoy konferentsii* [Problems of

- pile foundation construction. Proc. of the VI International Conference]. Moscow, 1998. Vol. 1, pp. 37–42.
14. 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 proektirovaniya i vozdeystviya svaynykh fundamentov* [Meeting seminar on the exchange of experience in the design and erection of pile foundations]. Moscow, 1966. pp. 2–6.
 15. Kuleshov A.P., Pendin V.V. Influence of methods for determining soil properties in numerical calculations of deformations. *Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 328, no. 12, pp. 63–74. In Rus.
 16. 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.
 17. Kurguzov K.V., Fomenko I.K. Sravnenie metodik rascheta nesushchey sposobnosti svay [Comparison of methods for calculating the bearing capacity of piles]. *Strategiya razvitiya geologicheskogo issledovaniya nedr: nastoyashchee i budushchee (k 100-letiyu MGRI-RGGRU). Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Strategy for development of geological exploration of mineral resources: the present and the future (to the 100th anniversary of MGRI-RGGRU). Proc. of the International Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2018. Vol. 2, pp. 254–255.
 18. Pendin V.V. *Kompleksny kolichestvenny analiz informatsii v inzhenernoy geologii* [Complex quantitative analysis of information in engineering Geology]. Moscow, KDU Publ., 2009. 350 p.
 19. Pilyagin A.V. *Proektirovanie osnovaniy i fundamentov zdaniy i sooruzheniy* [Design of foundations and foundations of buildings and structures]. Moscow, ASV Publ., 2017. 398 p.
 20. SP 22.13330.2016. *Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy* [Code of rules 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 69 p.
 21. SP 25.13330.2020. SNiP 2.02.04-88 *Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh* [Foundations and foundations on permafrost soils]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 110 p.
 22. GOST 5686-2020. *Grunty. Metody polevykh ispytaniy svayami* [Soils. Methods of field testing with piles]. Moscow, StandardInform Publ., 2021. 57 p.
 23. GOST 25358-2020. *Grunty. Metod polevogo opredeleniya temperatury* [Soils. The method of field determination of temperature]. Moscow, StandardInform Publ., 2021. 17 p.
 24. *Rukovodstvo po proektirovaniyu osnovaniy i fundamentov na vechnomerzlykh gruntakh* [Guidelines for the design of foundations and foundations on permafrost soils]. Moscow, StandardInform Publ., 1980. 303 p.
 25. *Rukovodstvo po proektirovaniyu svaynykh fundamentov* [Guidelines for the design of pile foundations]. Moscow, StandardInform Publ., 1980. 151 p.
 26. SP 50-101-2004. *Proektirovanie i ustroystvo osnovaniy i fundamentov zdaniy i sooruzheniy* [Design and installation of foundations and foundations of buildings and structures]. Moscow, StandardInform Publ., 2005. 138 p.

Received: 31 October 2022.

Reviewed: 21 January 2023.

Information about the authors

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

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

Lyudmila A. Strokova, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.