

ДИАГНОСТИКА С ПОМОЩЬЮ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МЁРЗЛОГО ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ, ОХЛАЖДЕННОГО ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОРАМИ

DIAGNOSTICS WITH CONE PENETRATION TEST OF A FROZEN SOIL BASE COOLED BY THERMAL STABILIZERS

Аннотация. Инженерные сооружения, построенные на вечной мерзлоте, могут испытывать неравномерные осадки и деформации в результате деградации мерзлых грунтов, вызванной различными факторами, такими как изменение климата, техногенное воздействие, перераспределение снежного покрова, изменением гидрогеологического режима. Даже небольшое изменение температуры мерзлых грунтов может существенно изменить их механические свойства и несущую способность основания, устроенного на таких грунтах. Современное оборудование для статического зондирования позволяет измерить температуру грунтов и оценить несущую способность сваи в условиях многолетнемерзлых грунтов.

В статье рассматривается применение статического зондирования для диагностики мерзлого грунтового основания Ямальского полярного аграрного техникума, в г. Салехард, ЯНАО. Мёрзлое грунтовое основание охлаждено термостабилизаторами, установленными в проветриваемом подполье. В ходе испытаний грунтов статическим зондированием были измерены лобовое усилие вдавливанию зонда q_c [МПа], боковое трение грунта по муфте зонда f_s [кПа] и температура грунта T [°C]. Статическое зондирование выполнено непосредственно из проветриваемого подполья в нескольких точках – вблизи к термостабилизаторам и сваям, в зоне теплового воздействия термостабилизаторов и на расстоянии от термостабилизаторов и свай – измерение «фоновых» значений вне зоны теплового воздействия термостабилизаторов. На основе полученных данных, выполнено следующее: 1) измерение понижения температуры мерзлых грунтов (охлаждающее воздействие термостабилизаторов), 2) оценка несущей способности свай, 3) сравнение несущей способности свай на различном удалении от термостабилизаторов, чтобы оценить увеличение несущей способности свай, вызванное охлаждением термостабилизаторами.

Abstract. Engineering structures built on permafrost may experience uneven settlement and deformation due to the degradation of permafrost caused by various factors, such as climate change, man-made impact, redistribution of snow cover, changes in hydrogeological regime. Even a small change in the temperature of frozen soils can significantly change their mechanical properties and pile bearing capacity. Modern equipment for Cone Penetration Test (CPT) allows measuring soil temperature and estimating pile bearing capacity in permafrost conditions.

The article discusses the use of CPT for the diagnosis of the frozen soil foundation of the Yamal Polar Agroeconomic College, located in Salekhard, Western Siberia, Russia. The frozen soil foundation is cooled by thermal stabilizers, installed in the ventilated underground. CPT tests measured cone resistance q_c [MPa], sleeve friction f_s [kPa] and temperature of the soil T [°C]. CPT was performed directly from the underground in several locations – close to thermal stabilizers and piles, i.e. within the zone of thermal stabilizers influence, and at a distance from thermal stabilizers and piles, i.e. “baseline” measurement. Based on collected data, 1) cooling effect caused by thermal stabilizers was measured (soil temperature decrease), 2) pile bearing capacity was estimated and 3) compared for different locations to quantify the increase of pile bearing capacity caused by thermal stabilizers cooling.

Ключевые слова: статическое зондирование, термостабилизатор, несущая способность сваи, диагностика мерзлого грунтового основания, температура многолетнемерзлых грунтов, многолетнемерзлые грунты.

Keywords: cone penetration test, thermal stabilizer, pile bearing capacity, investigation of foundation in frozen soils, temperature of frozen soil, permafrost.

Введение

В настоящее время испытание грунтов методом статического зондирования является основным методом изучения немерзлых дисперсных грунтов в полевых условиях или «in-situ» в геотехнике. Метод получил широкое распространение благодаря простоте, скорости выполнения и качеству получаемых результатов. Статическое зондирование на мерзлых грунтах на сегодня не является общепринятым методом. В инженерном сообществе до сих пор преобладает мнение, что из-за высокой прочности мерзлых грунтов технически невозможно задавить зонд в мерзлый грунт. Иногда делаются поправки, что статическое зондирование возможно только в пластичномерзлых грунтах, но точно не в твердомерзлых [1, 3]. Практика показывает, что такое мнение ошибочно и работы последних лет показывают хорошую применимость статического зондирования для изучения мерзлых грунтов [9].

Применение статического зондирования для инженерно-геокриологических изысканий дает большой объем ценной информации о строении и свойствах мерзлых грунтов, который зачастую не может быть получен с помощью других полевых методов исследований. Испытание грунтов проводится непосредственно в поле, а получаемые данные, являются in-situ, что в инженерно-геокриологических изысканиях особенно ценно ввиду



Рис. 1. Неравномерная осадка здания Ямальского аграрного колледжа

По данным проведенных инженерных изысканий было предположено, что осадка сооружения произошла в результате оттаивания мерзлых грунтов в основании здания до глубины 8 м. Несущая способность свай, по данным отчета, составляла 11 тс, которая была оценена по таблицам СНиПа, что вдвое меньше проектной.



Рис. 3. Деформационные маркеры на стене здания

сложности условий полевых работ и транспортировки мерзлых образцов в лабораторию.

Важной областью применения статического зондирования является геотехнический контроль оснований сооружений на вечной мерзлоте. На сегодня это единственный метод, который применим для диагностики состояния грунтового основания в условиях вечной мерзлоты. Геотехнический контроль с помощью статического зондирования регулируется СТО 36554501-049-2016 «Применение статического зондирования для контроля оснований в районах распространения многолетнемерзлых грунтов». В статье приведён опыт диагностики состояния грунтового основания под Ямальским полярным аграрно-экономическим техникумом с помощью статического зондирования.

Состав работ и площадка исследований

Здание техникума построено в 1977 году, 2 этажа, имеет свайный фундамент. Сваи длиной 8 м объединены железобетонным сплошным ростверком. В середине 2010-х начала происходить неравномерная осадка сооружения, в результате чего юго-восточный край сооружения отшел и произошел разрыв внешних стен (рис. 1). Эксплуатация здания была приостановлена. Внутри здания развивались деформационные трещины (рис. 2), за которыми был установлен мониторинг (рис. 3). Здание было усилено с помощью крепления стальных уголков (рис. 4).



Рис. 2. Трещина в стене здания Ямальского аграрного колледжа

По проекту нагрузка на сваю составляет 20 тс. По результатам инженерно-геологических изысканий был выполнен комплекс работ по укреплению сооружения и грунтов основания под ним. Он включил в себя стеновые подпорки, укрепление конструкций фундамента, расчистку проветриваемого подполья от мусора.



Рис. 4. Укрепление конструкции здания

Для восстановления температурного режима грунтов основания по периметру сооружения напротив свай были смонтированы алюминиевые термостабилизаторы длиной 8 м и диаметром 25 мм (рис. 5). К декабрю 2016 г. термостабилизаторы отработали 1 полный зимний цикл.



Рис. 5. Термостабилизатор около сваи

Сотрудниками ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС» были проведены работы с помощью статического зондирования для контроля качества работы термостабилизаторов и диагностике мерзлого грунтового основания под Ямальским полярным агрономическим техникумом. Температура воздуха на площадке в данный период менялась от -20°C до -26°C . Общее количество точек статического зондирования – 3, максимальная глубина зондирования $-12,16$ м. Расположение точек определялись исходя из рекогносцировочного обследования сооружения и расположения свай фундамента и термостабилизаторов (рис. 6).

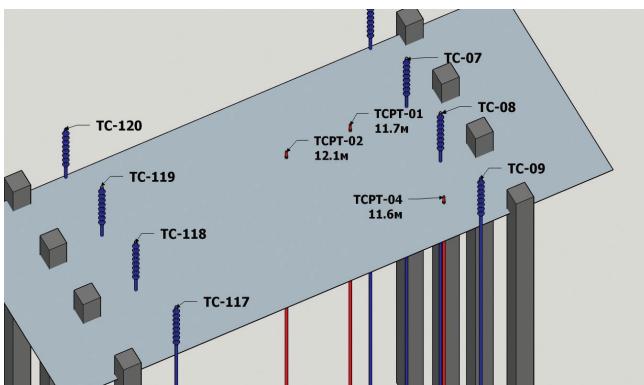


Рис. 6. Расположение точек статического зондирования (TCPT), термостабилизаторов (TC) и свай

Оборудование для выполнения испытаний статическим зондированием

Международная группа компаний «Фугро» обладает полным спектром оборудования для статического зондирования, которое разработано в мире на сегодняшний день. Статическое зондирование

может применяться как на суше, так и на море, как с автотранспорта, так и с железнодорожных платформ [4].

Установка оборудования для статического зондирования включает в себя либо комбинацию зондировочной установки и буровой установки, либо отдельный грузовик массой около 20 тонн на базе автомобиля-вездехода, предназначенному только для выполнения статического зондирования. Очевидно, что оборудование на базе автомобиля невозможно или крайне сложно установить под сооружением или внутри эксплуатируемого сооружения (за редким исключением промышленных цехов). Исходя из этого, было принято решение о применении малогабаритной установки для статического зондирования.

Статическое зондирование выполнялось с помощью малогабаритной установки с максимальным усилием вдавливания 100 кН (рис. 7). Питание мобильной установки обеспечивалось с помощью автономной бензиновой маслостанции. Зонд для статического зондирования на всех точках испытаний снабжен датчиками силы, а также датчиком замера температуры, что позволило точно определить температуру мерзлых грунтов в основании сооружения.



Рис. 7. Мобильная установка статического зондирования во время испытания

Данные с зонда в процессе испытания считывались на систему сбора данных и записывались на жесткий диск ноутбука. Частота считывания – 2 Гц. В процессе выполнения теста все измеряемые параметры отображались на экране ноутбука, что позволяло принимать оперативные решения в процессе проведения испытаний.

В проветриваемом подполье на площадке исследований была выполнена бетонная отмостка, которая затрудняла проникновению зонда. Для выполнения зондирования проводилось разбуривание отмостки до появления дисперсных грунтов. Глубина разбуривания составила от 120 до 180 мм по бетону. Для этого использовался перфоратор с твердосплавной шарошкой.

В пределах выделенного участка на исследуемой площадке высота проветриваемого подполья изменилась от 1,90 до 2,20 метра. Несмотря на достаточно стесненные условия по высоте, использование мобильной установки позволило без дополнительных мероприятий выполнить статическое зондирование. Реакция для вдавливания конуса создавалась оправлением задавливающего устройства в несущие конструкции сооружения.

Выполнение испытаний по статическому зондированию

Технология статического зондирования представляет собой погружение зонда в грунт под действием статической вдавливающей нагрузки с измерением показателей сопротивления грунта внедрению зонда двух видов: лобовое сопротивление или удельное сопротивление грунта под конусом наконечника, согласно определению, q_c МПа, и боковое трение или удельное сопротивление грунта на муфте трения наконечника, согласно определению, f_s кПа. Для исследования мерзлых грунтов необходим датчик температуры для замера температуры грунта. Подробная методика измерения температуры мерзлых грунтов с помощью статического зондирования приведена в работе Волкова Н.Г. и Соколова И.С. [10].

Для оценки эффективности работы термостабилизаторов зондирование проводилось ниже глубины их установки (8 метров), в частности до 11,5 и 12 метров (рис. 8). Задавливание конуса велось с постоянной скоростью 2 см/с, согласно СП 25.13330.2012 [5], и измерением следующих параметров:

- q_c [МПа] – лобовое сопротивление, или удельное сопротивление грунта под конусом наконечника, согласно определению, приведенному в СТО 36554501-049-2016;

- f_s [кПа] – боковое трение, или удельное сопротивление грунта на муфте трения наконечника, согласно определению, приведенному в СТО 36554501-049-2016;

- T [°C] – температура.

Лобовое сопротивление и боковое трение

В процессе выполнения статического зондирования были получены графики измеряемых параметров, по характеру которых можно судить о изменчивости геологического строения. Величина лобового сопротивления в мерзлых грунтах изменяется в очень широких пределах и составляет от нескольких МПа в глинистых грунтах с высокой температурой до предельно измеряемых величин в 50–60 МПа в хорошо уплотненных мерзлых песках насыпи или плотных мерзлых суглинках с низкой температурой. Значения трения по боковой поверхности зонда также напрямую связаны не только с типом грунта и его плотностью, но и температурой. Величина трения также изменяется в очень широких пределах и может достигать величины до нескольких сотен кПа в грунтах с высокой льдистостью или плотностью.

Интерпретация данных и выделение толщ однородного строения

Метод полевых испытаний грунтов зондированием (ГОСТ 19912-2012) в комплексе с инженерно-геологическим бурением позволяет выделять инженерно-геологические элементы. На основе данных, полученных с помощью статического зондирования на площадке исследования, и данных инженерно-геологического бурения, выполненным ранее в 2014 году, было выделено 5 ИГЭ (рис.8).

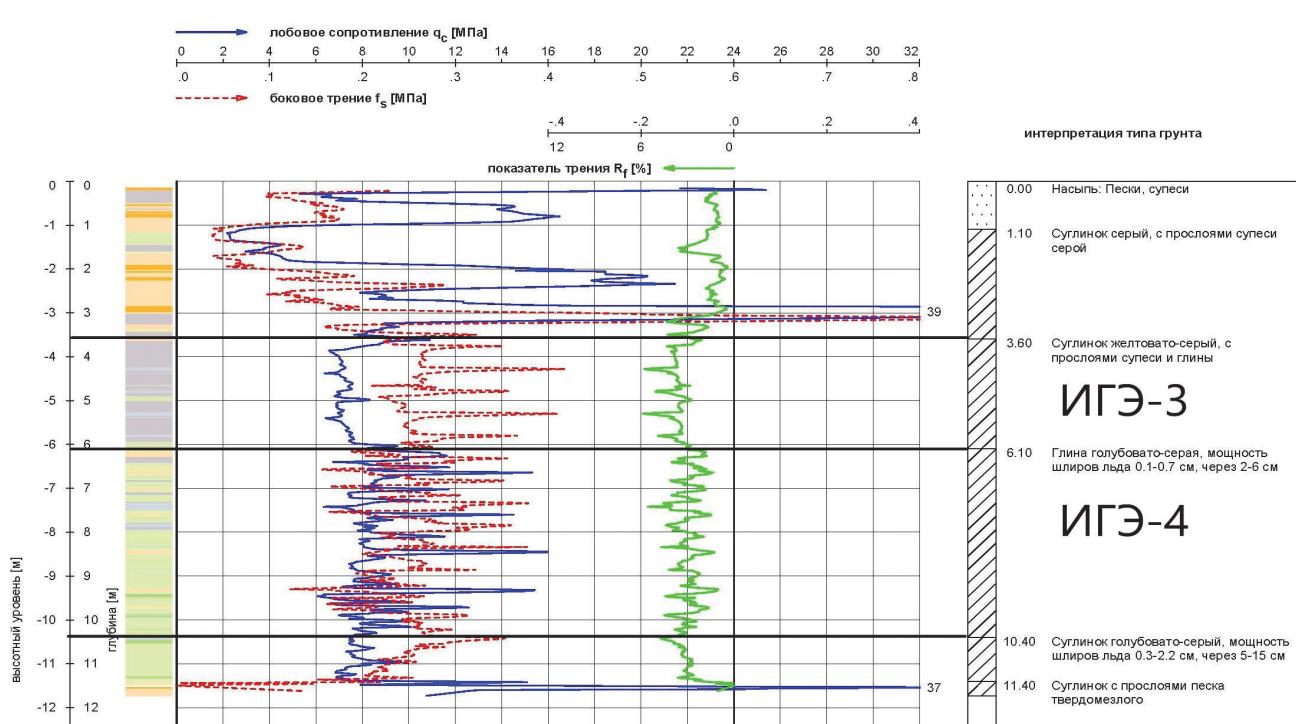


Рис. 8. Выделение ИГЭ на основе данных по статическому зондированию и ИГ бурению ТСТР-01

Важно отметить, что описание грунтов на основе инженерно-геологического бурения соответствует интерпретации данных статического зондирования. Например, в ИГЭ-03, представленным желтовато-серым суглинком, по данным бурения были встречены прослои супеси и глины, что четко видно на графике статического зондирования по характерным пикам пунктирной красной линии (боковое трение). В ИГЭ-04, представленным голубовато-серой глиной, были встречены шлиры льда, что фиксируется на графике статического зондирования по характерным пикам синей линии (лобовое сопротивление).

На примере графика статического зондирования (рис. 8) в точке ТСРТ-01 видно, что в разрезе до глубины 11,5 метров выделяется 5 инженерно-геологических элементов, что коррелирует с результатами бурения.

ИГЭ 1 Песок техногенный, мелкий с примесью супеси, температура колеблется от $-12,5$ до $-1,2$ $^{\circ}\text{C}$, показывает лобовое сопротивление до 25 – 30 МПа, трение по боковой поверхности также высокое и составляет $0,3$ – $0,5$ МПа.

ИГЭ 2 Суглинок с прослойми супеси, самый неоднородный элемент разреза, так как он находится одновременно и в талом и в мерзлом состоянии, на границе деятельного слоя. В верхней части, на глубинах до $1,8$ – $2,0$ метра, характеризуется высокой температурой, вплоть до $+0,1$ $^{\circ}\text{C}$, и низкими показателями лобового сопротивления – 2 – 4 МПа; трения по боковой поверхности – $0,05$ – $0,1$ МПа. В нижней части при переходе этого грунта в мерзлое состояние наблюдается существенное увеличение этих показателей: температура снижается до $-0,5$ – $-1,3$ $^{\circ}\text{C}$ и увеличиваются показатели лобового сопротивления – 30 – 40 МПа и бокового трения – $0,2$ – $0,4$ МПа. При этом из-за включенных ледяных шлиров график имеет характерную «игольчатую» форму.

ИГЭ 3 Суглинок желтовато-серый с прослойми глины. Элемент достаточно однороден по своим показателям, в нем содержится относительно меньшее число шлиров, но большее число глинистых прослоев небольшой мощности. Это хорошо видно по большому количеству «пиков» на графике бокового трения. Величина лобового сопротивления в среднем – 6 – 11 МПа, с тенденцией к увеличению при снижении температуры. Боковое трение высокое и составляет – $0,15$ – $0,25$ МПа с «пиками» до $0,4$ МПа.

ИГЭ 4 Глина голубовато-серая сильнольдистая. Данный элемент характеризуется значительным разбросом значений как лобового сопротивления, так и бокового трения, что обусловлено высокой льдистостью и наличием частых ледяных шлиров. Вид графика также характерен для всех точек испытаний и имеет тенденцию к увеличению показателей со снижением температуры. На этот элемент приходится наиболее активная зона работы термостабилизаторов. Величина лобового сопротивления – 8 – 12 МПа, с отчетливо выраженным «пиками» до 20 – 22 МПа. Боковое трение – $0,15$ – $0,30$ МПа, с большим разбросом значений.

ИГЭ 5 Суглинок голубовато-серый льдистый. Лобовое сопротивление – 8 – 10 МПа, значения с небольшим разбросом, но также заметны отскоки в местах прохождения ледяных шлиров. Боковое трение – $0,2$ – $0,3$ МПа, с небольшим разбросом. Стоит отметить, что грунты в ИГЭ 3 и ИГЭ 4 наиболее показательны в части изменения свойств с уменьшением температуры. В процессе обработки наблюдается значительное увеличение значений измеряемых параметров даже при незначительном снижении температуры.

Замеры температуры. Принято классифицировать два вида задавливания зонда – непрерывное и прерывистое [1]. Непрерывное задавливание зонда в грунт происходит с постоянной скоростью, как правило 2см/сек , а перерывы в погружении зонда осуществляются для наращивания штанг задавливающей колонны. Прерывистое задавливание зонда в грунт также происходит с постоянной скоростью, однако перерывы осуществляются на заранее заданной глубине, где выполняется испытание грунтов зондированием по специальным методикам (релаксационно-ползучие, диссипационные, квазистатические и другие испытания). В ходе испытаний на площадке Ямальского полярного агрономического техникума выполнялось прерывистое задавливание с остановками для замера температуры грунта (рис. 9).

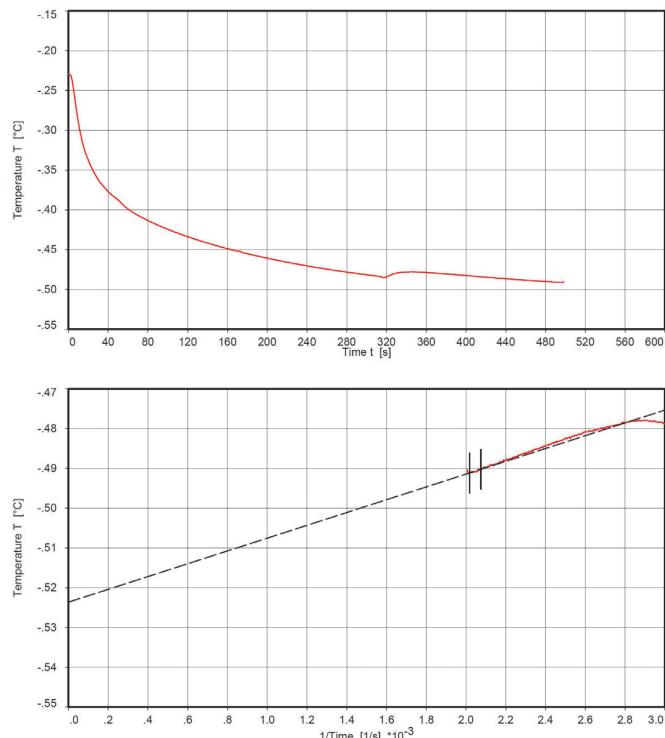


Рис. 9. Замер температуры в ТСРТ-01
на глубине 5,38 м

Установлено, что на этой глубине температура грунта составила $-8,85$ $^{\circ}\text{C}$, поскольку замер производился в начале декабря, и температура воздуха в течение недели изменялась в пределах от -20 до -30 $^{\circ}\text{C}$. Грунт на такой глубине обычно не принимается в расчет, что и

было сделано. Однако стоит обратить внимание, что даже такие низкие температуры мерзлого грунта не явились непреодолимым препятствием для пенетрации зонда и выполнения статического зондирования, вопреки общепринятым мнению о невозможности статического зондирования на мерзлых грунтах.

Стоит отметить, что при задавливании зонд, как правило, разогревается, вследствие трения его боковой поверхности о грунт. Однако иногда при прохождении мерзлых глинистых грунтов, зонд может слегка охлаждаться. Этот эффект пока не изучен. Возможно, это смещение точки кристаллизации льда. Лед начинает таять вследствие вдавливания зонда, но не благодаря повышению температуры, а благодаря повышению давления, которое может составлять несколько десятков мегапаскалей. Лед растаяв, поглощает теплоту из окружающего грунта, что ведет к небольшому снижению температуры. Этот эффект также работает и в песчаных грунтах, однако его проявление перекрывается разогревом из-за трения. Исходя из опыта международной группы компаний «Фугро», можно сделать вывод, что разогрев в мерзлых грунтах существенно ниже, чем в талых. Этот эффект пока мало изучен, и требует накопления больших материалов. Интенсивность разогрева зонда зависит от ряда факторов, таких как состояние грунта (мерзлое/талое), тип грунта, плотность грунта, скорости вдавливания зонда и др. Данный вопрос является темой для отдельной научной статьи.

На графиках замера температуры (рис.10) в точках зондирования видно воздействие термостабилизатора на окружающий грунт, в точке TCPT-02, находящейся на расстоянии 2,05 м от стабилизатора температурного поля нет, это «фоновые», естественные значения температур. Далее, по мере приближения к стабилизатору видно его температурное поле. Так в точке TCPT-01 – 0,96 м от стабилизатора – температура грунтов заметно ниже, а в точке TCPT-04 – 0,72 м от стабилизатора – замеренные температуры самые низкие, что подтверждает работоспособность и исправность стабилизатора.

Замеренные температуры грунтов

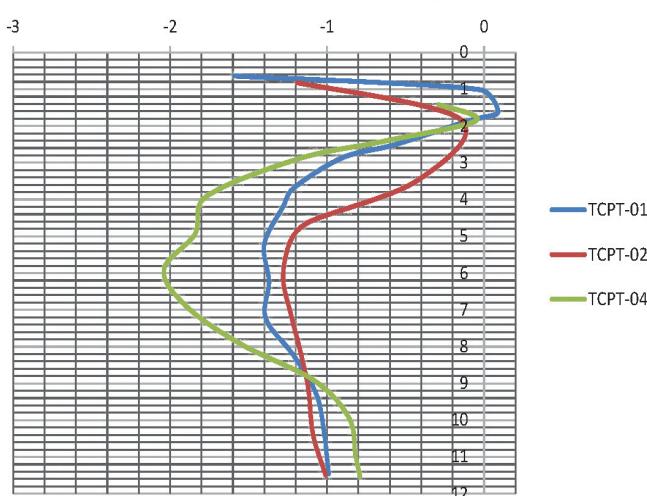


Рис. 10. Замеренные температуры грунта по глубине в точках TCPT-01, TCPT-02 и TCPT-04

Анализ полученных температурных значений (табл. 1) показывает, что на глубине 2–3 метра температура грунтов составляет $-0,5 \div -1,0$ °C. Далее по глубине в фоновой точке TCPT-02 температура грунтов изменяется в пределах $-1,0 \div -1,28$ °C, достигая своего минимума на глубине 6,1 метров. В точке TCPT-01 наблюдается небольшое понижение температуры по сравнению с фоновой точкой и температура грунтов изменяется в пределах $-1,0 \div -1,4$ °C, достигая своего минимума на глубине 5,2 метров в $-1,4$ °C. Наибольшее понижение температуры грунтов было замерено в точке TCPT-04, которая расположена наиболее близко к термостабилизаторам, на расстоянии 0,72 м от ТС-8 и ТС-9. Так, на глубине 5,9 метров температура мерзлых грунтов достигла $-2,04$ °C. Такое понижение температуры грунтов также обусловлено расположением точки TCPT-04, где встречаются радиальные тепловые потоки, направленные к двум термостабилизаторам.

На основе полученных результатов замера температуры можно утверждать, что термостабилизаторы находятся в рабочем состоянии и значительно охлаждают мерзлый грунт за первый зимний сезон. Однако, стоит отметить и то, что термостабилизаторы имеют достаточно большую «пассивную» часть испарителя, и начиная с глубины 6 метров, охлаждающее воздействие термостабилизаторов быстро снижается, что видно по температурному градиенту с 6 до 9 метров (TCPT-04). Так температура мерзлых грунтов в точке испытаний TCPT-04 повышается с $-2,04$ °C до $-1,10$ °C. На глубине 9 метров температура мерзлых грунтов принимает значение около $-1,10$ °C во всех точках испытаний.

Возможно, понижение температуры мерзлых грунтов на $-0,76$ °C может показаться незначительным. Однако, это дает существенное увеличение значений механических свойств мерзлых грунтов.

В ряде случаев при необходимости режимных наблюдений за температурой точка статического зондирования может быть оборудована в термометрическую скважину. Для обустройства термометрической точки на основе статического зондирования использовалась сплошная пластиковая труба диаметром 32 мм. Труба герметизируется заглушкой на забое скважины и не имеет стыков и других соединений, что исключает возможность затопления скважины подземными водами. Также, вследствие малого диаметра трубы снижается погрешность измерения температуры грунта за счет уменьшения конвекции воздуха в скважине и за счет более надежной герметизации устья.

Монтаж трубы и установка термокосы производился в течение одного часа. При этом технология обустройства термометрических скважин таким способом полностью соответствует требованиям ГОСТ 25358-2012 [8].

Анализ полученных результатов

Сравнение измеренных данных по лобовому сопротивлению, боковому трению и температуре. Для более детального анализа характеристик грунтов были

Таблица 1. Замеренные температуры грунта по глубине в точках TCPT-01, TCPT-02 и TCPT-04

TCPT-01		TCPT-02		TCPT-04	
Глубина от поверхности, м	Температура, °C	Глубина от поверхности, м	Температура, °C	Глубина от поверхности, м	Температура, °C
0,10	-9,73	0,35	-7,08	0,40	-12,56
0,65	-1,59	0,80	-1,19	0,90	-4,63
1,00	-0,03	1,80	-0,15	1,40	-0,29
1,60	0,09	3,50	-0,42	1,85	-0,05
1,85	-0,1	4,60	-1,11	2,40	-0,62
2,50	-0,57	5,10	-1,23	2,90	-1,18
2,85	-0,9	6,10	-1,28	3,90	-1,77
3,70	-1,21	7,10	-1,23	4,90	-1,84
4,20	-1,28	8,10	-1,17	5,90	-2,04
5,20	-1,4	9,10	-1,12	6,90	-1,89
6,20	-1,37	10,40	-1,09	7,90	-1,55
7,20	-1,39	11,50	-1,01	8,90	-1,08
8,20	-1,21			9,90	-0,86
9,30	-1,07			10,90	-0,82
11,50	-0,99				

выбраны ИГЭ-03 и ИГЭ-04. Этот выбор объясняется тем, что ИГЭ-01 и ИГЭ-02 расположены в деятельном слое (слой сезонного промерзания/оттаивания), а ИГЭ-05 располагается ниже основания сваи, значит, данные элементы не участвуют полностью или частично в расчете несущей способности сваи.

Помимо расчета несущей способности сваи, особый интерес вызывает оценка воздействия температурного поля (точнее пониженной температуры мерзлых грунтов термостабилизаторами) на механические свойства мерзлых грунтов. Для оценки температурного воздействия на свойства мерзлых грунтов решено построить графики изменения температуры, лобового сопротивления и бокового трения по глубине для ИГЭ-03 и ИГЭ-04 (рис. 11 и 12). При построении графиков

была проведена обработка данных, где значение для каждой точки на глубине рассчитывалось как среднее значение, следуя алгоритму, применяемому при расчете несущей способности сваи. Эта обработка данных «сглаживает» острые пики на кривых лобового сопротивления и бокового трения, что позволяет нагляднее представить интересуемый нас эффект.

На рис. 11 и 12 видно, что с понижением температуры возрастает лобовое сопротивление и боковое трение. Причем в точке испытаний TCPT-04 температура достигала наименее низких значений из-за наименее близкого расположения к термостабилизаторам, что также отразилось на более высоких значениях лобового сопротивления и бокового трения, что наглядно видно на рис. 11 и 12.

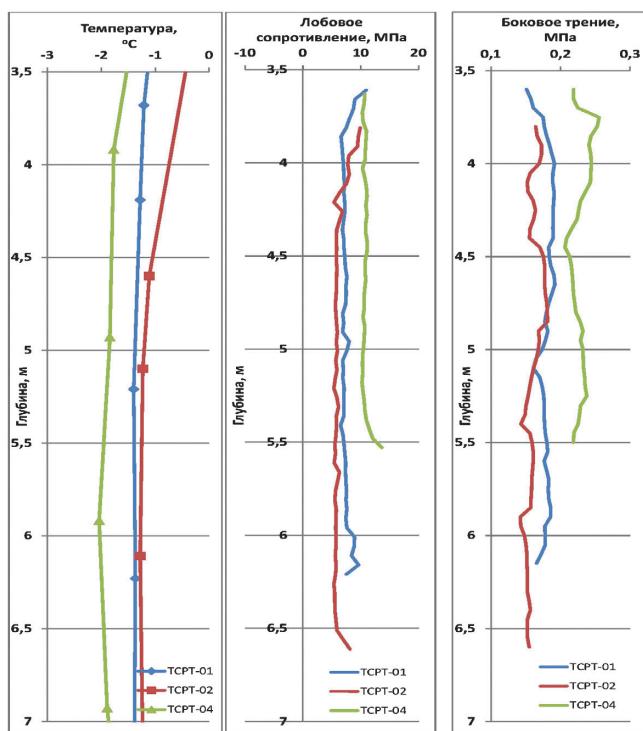


Рис. 11. Зависимость температуры, лобового сопротивления q_c и бокового трения f_s от глубины для ИГЭ-03

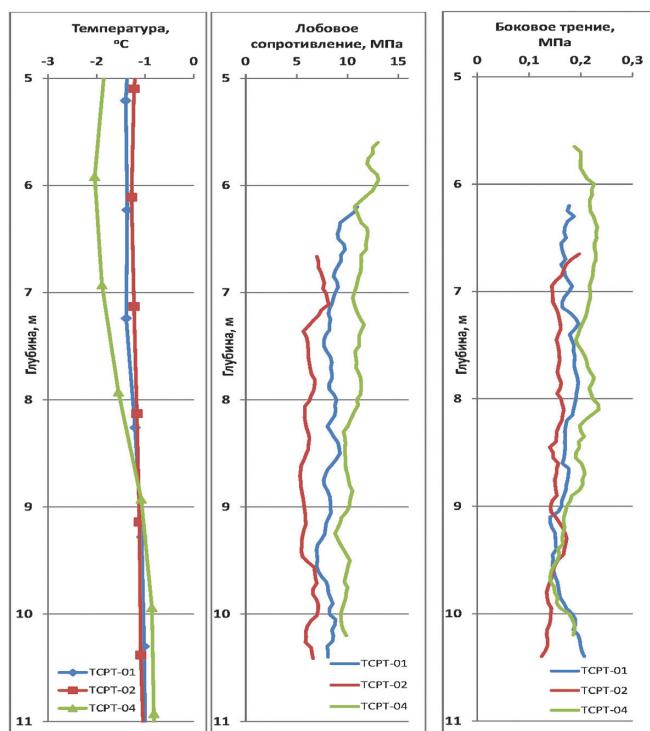


Рис. 12. Зависимость температуры, лобового сопротивления q_c и бокового трения f_s от глубины для ИГЭ-04

Расчет несущей способности

Расчет несущей способности сваи производился в соответствии с требованиями СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» (Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88), Приложение Л «Определение механических свойств и несущей способности оснований свай в многолетнемерзлых грунтах по результатам статического зондирования». Тип сваи – забивная железобетонная. Сечение сваи 300x300 мм. Для выполнения расчетов проводится интерпретация данных статического зондирования для определения типа грунта, мерзлое или талое. Расчет не учитывал первые три метра грунтового разреза, так как практика расчетов обычно исключает деятельный слой (насыпной грунт, слой сезонного промерзания/оттаивания).

Расчет несущей способности забивной сваи, проведенный по данным статического зондирования (таблица 2), показал, что забивная свая 300x300 мм длиной 8 метров в грунтовых условиях, не охлажденных термостабилизаторами, будет иметь несущую способность 53 тонны (TCPT-02), а в охлажденных условиях 62 тонны (TCPT-01) и 77 тонн (TCPT-04). В относительных величинах увеличение несущей способности сваи составило 17% (TCPT-01) и 45% (TCPT-04). Стоит отметить, что расчет был выполнен на всю глубину испытаний и на глубине 11 метров соотношение значений несущей способности сваи для трех точек испытаний составило 16% (TCPT-01) и 42% (TCPT-04). Уменьшение этих значений может быть объяснено двумя факторами: неоднородностью грунта и ослаблением охлаждающего воздействия термостабилизаторов с глубиной.

Таблица 2. Результаты расчета несущей способности сваи

Глубина, м	TCPT-01	TCPT-02	TCPT-04
	Несущая способность сваи, т		
1	–	–	–
2	–	–	–
3	–	–	–
4	28	30	36
5	37	34	48
6	46	41	58
7	53	48	69
8	62	53	77
9	69	59	86
10	75	66	92
11	87	75	107
	+16%		+42%

Заключение

В результате проведенных испытаний было установлено, что все грунты в основании сооружения находятся в мерзлом состоянии и предполагаемого оттаивания до глубины 8 м не произошло. Измеренные значения температуры в «фоновой» точке зондирования находятся в диапазоне от $-0,4^{\circ}\text{C}$ до $-1,3^{\circ}\text{C}$. По результатам расчетов несущая способность одиночной забивной сваи размером

300x300 мм длиной 8 м составляет около 53 тс без учета деятельного слоя, что существенно превышает проектную нагрузку в 20 тс. Термостабилизаторы оказали охлаждающее влияние на грунты и за первый сезон понизили температуру грунтов на $-0,5^{\circ}\text{C} \div -0,8^{\circ}\text{C}$ (до $-1,0^{\circ}\text{C} \div -2,1^{\circ}\text{C}$), что привело к увеличению несущей способности сваи до 77 тс, или на 42% по сравнению с фоновым значением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжков И. Б., Исаев О.Н. Статическое зондирование грунтов / Рыжков, И. Б., Исаев, О.Н. – Москва: Изд-во АСВ, 2010. – 496 с.
2. Lunne T, Robertson P.K. and Powell J.J. Cone penetration testing in geotechnical practice. – London and New York: Spon Press, 2004.
3. Ryzhkov I.B., Isaev O.N. Cone Penetration Testing of Soils in Geotechnics. Stockholm, Sweden: ASV Construction, 2016. – 408 p.
4. Sokolov I.S., Volkov N.G., Isaev V.S. Cone Penetration Testing for Railways on Permafrost. XI International Conference on Permafrost, 2016.
5. СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Приложение Л. Москва, 2012.
6. СТО 36554501-049-2016 Применение статического зондирования для контроля оснований в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. НИЦ Строительство, НИИОСП, Москва, 2016.
7. ГОСТ 19912-2012 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием.
8. ГОСТ 25358-2012 Грунты. Метод полевого определения температуры.
9. Volkov N., Sokolov I., Jewell R., 2018. CPT Testing in Permafrost. Proceedings 4th International Symposium on Cone Penetration Testing. CPT'18, Delft, Netherlands, 2018, pp. 1258–1268.
10. Волков Н.Г., Соколов И.С., 2018. Сравнение температурных замеров грунтов с помощью статического зондирования и скважинной термометрии. Инженерные изыскания, Том XII, № 7–8, с. 16–24.

Благодарности:

Авторы статьи и коллектив компании ГЕОИНЖСЕРВИС выражают искреннюю благодарность всем людям принимавшим участие в реализации этого проекта: директору Научного центра изучения Арктики Антону Ивановичу Синицкому за содействие в организации и проведении полевых работ и подготовке отчетных материалов, начальнику отдела технического надзора Дирекции капитального строительства и инвестиций ЯНАО Сергею Николаевичу Черкашину за предоставленную возможность продемонстрировать методику на промышленных объектах г. Салехарда; директору Межрегионального экспедиционного центра «Арктика» Андрею Владимировичу Барышникову за логистику и предоставленный транспорт.

Благодаря их заинтересованности и энтузиазму удалось реализовать этот проект, несмотря на сложные условия.