

Геотехнический мониторинг мерзлого грунтового основания с помощью статического зондирования

Николай Генрихович ВОЛКОВ, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер, e-mail: ngv@fugro.ru

Иван Сергеевич СОКОЛОВ, инженер-геолог, e-mail: ssi@fugro.ru

ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС» (группа компаний «Фугро»), 119331 Москва, просп. Вернадского, 29

Аннотация. Представлен новый подход к диагностике состояния мерзлого грунтового основания, изложены некоторые аспекты исследования физических процессов, которые оказывают воздействие на свойства многолетнемерзлых грунтов. Рассмотрено влияние изменения температуры в диапазоне от 0 °С до –10 °С на состояние мерзлого грунта. Показана важность учета концентрации раствора солей в поровой влаге в мерзлом грунте. На примере недавних исследований специалистов группы компаний «Фугро» на различных площадках выявлено, что при помощи статического зондирования можно проводить оценку состояния мерзлых грунтов и учет их свойств для проектирования оснований и фундаментов сооружений. На основе нового подхода к геотехническому мониторингу предложена классификация состояния мерзлого грунтового основания по отношению к свайному фундаменту, которая позволяет принять обоснованное решение по мерам инженерной защиты сооружения. Предложенный подход дает возможность на ранних этапах диагностировать ухудшение состояния мерзлого грунтового основания и своевременно предпринимать адекватные меры инженерной защиты сооружения.

Ключевые слова: геотехнический мониторинг, статическое зондирование, многолетнемерзлые грунты, сезонно-охлаждающие устройства, засоленность грунта, температура грунта, свайное основание, несущая способность сваи.

GEOTECHNICAL MONITORING OF FROZEN EARTH FOUNDATION BY CONE PENETRATION TEST

Nikolay G. VOLKOV, e-mail: ngv@fugro.ru

Ivan S. SOKOLOV, e-mail: ssi@fugro.ru

LLP "GEOINGSERVICE" (Fugro Group), prosp. Vernadskogo, 29, Moscow 119331, Russian Federation

Abstract. This paper introduces a new approach to the diagnostics of frozen earth foundation condition and some aspects of physical processes, which impacts on properties and condition of permafrost soils. The influence of temperature change in the range from 0 to –10 °C on the state of frozen soil is considered. The significance of the concentration of salts in the pore water in the frozen earth is shown. On the example of recent studies of specialists of the "Fugro Group" on various sites it is revealed that with the help of cone penetration testing it is possible to assess the state of frozen soils and take into account their properties for the design of bases and foundations of structures. The new classification of frozen earth base condition with relation to pile foundation based on the new approach to geotechnical monitoring is proposed that makes it possible to adopt a sound decision on engineering protection measures. The proposed approach makes it possible to diagnose permafrost weakening/degradation under monitored structures at early stages and timely take proper adequate actions on engineering protection measures.

Key words: geotechnical monitoring, cone penetration test, permafrost soil, seasonal cooling units, salinity, soil temperature, pile foundation, pile bearing capacity.

Введение

Свойства мерзлых грунтов существенно зависят от температуры, что значительно сказывается на поведении свайных фундаментов, расположенных на вечной мерзлоте. Даже небольшое изменение отрицательной температуры вечномерзлых грунтов вблизи места замерзания может влиять на их свойства. Механические свойства засоленных вечномерзлых грунтов, широко встречаю-

щихся в Арктике (прибрежные низменности, мелководье вдоль Арктического побережья и шельф), особенно чувствительны к температуре и засоленности. Засоленные мерзлые грунты содержат незамерзшую поровую влагу с высокой концентрацией соли при температурах существенно ниже 0 °С. В этой связи определение механических характеристик засоленных мерзлых грунтов — большая проблема для про-

ектирования оснований инженерных сооружений в Арктике.

Температурная чувствительность засоленных мерзлых грунтов также усложняет отбор и испытания образцов в лаборатории. Для минимизации повреждения целостности образцов их температура должна поддерживаться как можно ближе к значениям температуры *in situ*. Любое существенное отклонение в температуре образца во время отбо-

ра, хранения и транспортировки может привести к необратимым нарушениям. Таким образом, испытания мерзлых грунтов (in situ) являются наиболее целесообразными, учитывая дополнительную сложность в контроле температуры при отборе ненарушенных образцов для лабораторных испытаний.

Сезонно-охлаждающие устройства (СОУ) достаточно широко используются для извлечения тепла из грунта, которое передается в атмосферу в зимнее время, чтобы поддерживать низкие значения отрицательной температуры в охлаждаемом вокруг СОУ грунте. Механизм теплопереноса работает только в одном направлении и не приносит тепла в грунт в летний период (тепловой диод). Испытания статическим зондированием дают возможность измерить механические характеристики грунта и его температуру по глубине в непосредственной близости от установленных СОУ, что позволяет проводить прямые наблюдения за их работой. Небольшое отверстие, сформированное после испытания статическим зондированием, может быть использовано для установки трубки из ПВХ для постоянного температурного мониторинга [1].

Статическим зондированием с помощью дополнительных датчиков температуры и порового давления [2] можно получить ценные сведения о мерзлых грунтах. Датчик температуры позволяет измерить температуру мерзлого грунта с высокой точностью [1, 3], а датчик порового давления предоставит дополнительные данные о границах между мерзлыми и талыми грунтами.

Другие типы датчиков служат для определения сопротивления, на основе которого можно оценить льдистость или содержание летучих органических веществ, таких как метан. Проводить та-

кие измерения можно с помощью технологии MIP (Membrane Interface Probe).

Засоленные многолетнемерзлые грунты

Засоленные многолетнемерзлые грунты широко распространены в Арктике, особенно вдоль Арктического побережья на прибрежных низменностях, мелководье и шельфе. Источник засоленности связан с морской водой. Засоленность может существенно меняться в зависимости от типа мерзлых грунтов, расположения ландшафта по отношению к морской береговой линии и геологической истории грунтовой толщи. Высокая засоленность вечной мерзлоты приурочена к трансгрессии и регрессии Северного Ледовитого океана. Циклические изменения температуры мерзлых отложений, как правило морского генезиса, сформировали линзы низкотемпературных рассолов (криопэгов). Криопэги — это подземные природные воды, имеющие отрицательную температуру, не замерзающие в результате того, что понижение температуры замерзания обусловлено растворенными солями [4].

С точки зрения инженерной геокриологии, засоленные мерзлые грунты — очень сложная для изучения система [5]. Поведение засоленных мерзлых грунтов меняется в зависимости от температуры. Если температура грунта выше температуры начала его замерзания, применяется общая механика грунтов. Как только температура грунта становится ниже температуры замерзания и формируются первые кристаллы льда, грунт рассматривается как пластичномерзлый. Дальнейшее понижение температуры приводит к образованию большего количества льда в поровом пространстве. Когда объем льда превышает некоторое критичес-

кое значение, кристаллы льда начинают формировать связи между собой, а грунт ведет себя, как твердомерзлый (ГОСТ 25100—2011 «Грунты. Классификация»). Температурные границы между немерзлым, пластичномерзлым, твердомерзлым состояниями грунта определяются для каждого конкретного грунта отдельно в поле или лаборатории.

Содержание незамерзшей воды. Известно, что количество незамерзшей воды значительно влияет на прочностные и деформационные свойства мерзлых грунтов [5, 6]. В свою очередь, содержание незамерзшей воды в мерзлом грунте определено несколькими факторами. Наиболее важные из них — минеральный состав и засоленность грунтов.

В работе [5] рассмотрены примеры зависимости содержания незамерзшей воды от температуры при различных засоленностях D_s в мерзлых грунтах. Так, при общей влажности глины 48 % при температуре -1°C общее влагосодержание глины распределяется на льдистость 28 % и содержание незамерзшей воды 20 %. При температуре -5°C льдистость увеличивается до 38 %, а содержание незамерзшей воды снижается до 10 %. Если же глина засолена, то растворенные в поровом растворе соли оказывают существенное влияние на фазовый состав мерзлой глины. С повышением засоленности (при прочих равных условиях, включая общую влажность), содержание незамерзшей воды увеличивается. Например, соотношение льда 28 % и незамерзшей воды 20 % наблюдается для засоленной мерзлой глины с $D_s = 0,1\%$ при -1°C , а для глины с $D_s = 1,5\%$ при -8°C . Данное изменение фазового состава, обусловленное температурой и засоленностью, оказывает сильное влияние на механические свойства засоленных мерзлых грунтов.

Механические свойства мерзлых грунтов и несущая способность свай. Механические свойства засоленных мерзлых грунтов сильно зависят от температуры и засоленности благодаря содержанию незамерзшей воды. В табл. В.9 СП 25.13330.2012 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на многолетнемерзлых грунтах» приведены параметры сдвига по поверхности смерзания R_{af} для засоленных мерзлых грунтов с морским типом засоления. Это рекомендованные значения, которые качественно отражают влияние температуры и засоленности. Представленные в своде правил величины показывают огромное влияние температуры и засоленности на механические свойства засоленных мерзлых грунтов. Так, увеличение температуры с $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ может снизить сопротивление сдвигу по поверхности смерзания в 3 раза при $D_s = 0,05\%$, и в 15 раз — при $D_s = 0,5\%$. В свою очередь увеличение засоленности с $D_s = 0,05\%$ до $D_s = 0,5\%$ может уменьшить сопротивление сдвигу по поверхности смерзания в 2 раза при температуре $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в 10 раз — при $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сочетание изменения температуры и засоленности мерзлых грунтов дает мультипликативный эффект на снижение сопротивления сдвигу по поверхности смерзания.

Схожий эффект будет наблюдаться и для других механических свойств мерзлых засоленных грунтов, таких как модуль деформации, прочность, сцепление и др.

Примеры применения статического зондирования на многолетнемерзлых грунтах, выполненного группой компаний «Фугро»

В 2014 г. проведено статическое зондирование многолетнемерзлых грунтов в рамках инженерно-геологических изысканий

на нескольких площадках в городах Салехарде и Лабытнанги (Ямало-Ненецкий автономный округ). Общее количество точек статического зондирования составило 22, где многолетнемерзлые грунты были обнаружены и подтверждены с помощью температурного датчика. Во всех точках была достигнута проектная глубина, т. е. не зафиксировано раннего отказа по лобовому сопротивлению, что характерно для твердых и/или прочных грунтов, и не потребовалось разбурирования. Максимальная глубина зондирования — 34 м. Температура исследованных мерзлых грунтов варьировалась от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Лобовое сопротивление зонда вдавливанию в грунт составило от 8 до 40 МПа в зависимости от типа грунта.

В 2015 г. выполнен пилотный проект по диагностике основания железнодорожной насыпи, расположенной недалеко от г. Воркуты. Статическое зондирование проводилось непосредственно с железнодорожной платформы-вагона в течение трехчасового окна в расписании движения поездов. Глубина зондирования составила 12 м. Было выполнено шесть замеров температуры грунтов, которые показали наличие мерзлых грунтов с температурой от $-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубине от 4 до 12 м. Важно отметить, что лобовое сопротивление мерзлого грунта на данной глубине не показало больших значений от 8 до 12 МПа, а железнодорожная насыпь, сложенная щебенистым материалом, оказалась значительным, но преодолимым препятствием для проникания зонда, где лобовое сопротивление доходило до 45 МПа.

В декабре 2016 г. представлен пилотный проект, где с помощью статического зондирования оценена эффективность работы термостабилизаторов, установлен-

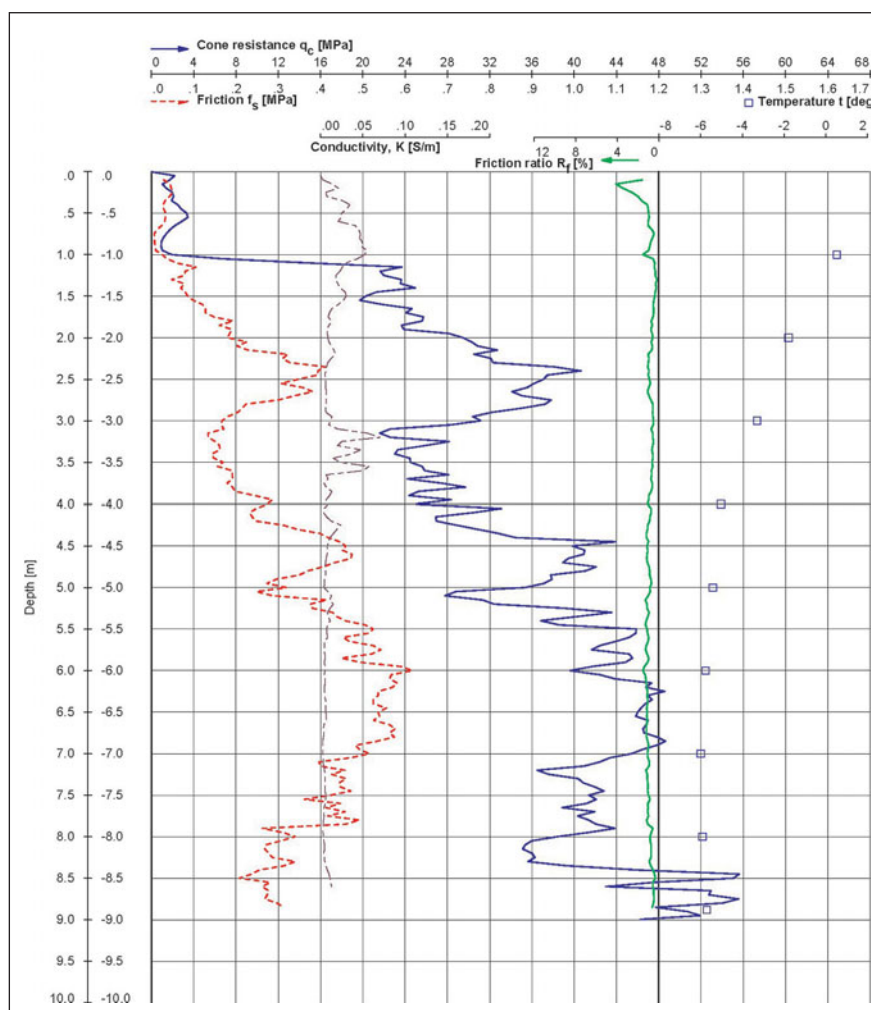
ных около свай основания Ямальского агроэкономического техникума (г. Салехард). Подробно данные исследования были опубликованы в 2017 г. [3]. Мерзлые грунты под техникумом были охлаждены с помощью термостабилизаторов, установленных около каждой сваи в проветриваемом подполье. Испытания статическим зондированием с измерением лобового сопротивления, бокового трения и температуры были выполнены из проветриваемого подполья высотой 2 м в трех точках в непосредственной близости от сваи до глубины 11–12 м. Полученные данные характеризовали мерзлые грунты в зоне теплового воздействия термостабилизатора и вне его. Последнее было проведено для получения фоновых значений грунта, не подверженных влиянию термостабилизаторов. Полученные результаты включали: замеренное охлаждающее воздействие термостабилизаторов (снижение температуры грунта), оценку несущей способности свай и сравнение несущей способности свай в различных точках по отношению к термостабилизатору (вблизи него и на удалении) [3].

Результаты испытаний показали, что грунтовое основание находилось в мерзлом состоянии и деградации мерзлоты до глубины 8 м не происходило, в противоречие с тем, о чем было сказано в материалах предыдущих изысканий. Измеренная температура мерзлых грунтов вне зоны теплового воздействия термостабилизатора изменялась от $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ по глубине. Несущая способность свай 300×300 мм длиной 8 м была рассчитана по методике, изложенной в прил. Л СП 25.13330.2012, и составила 530 кН без учета слоя сезонного оттаивания. Это существенно превышает проектную нагрузку на сваю в 200 кН. В свою оче-

редь термостабилизаторы охладили массив мерзлого грунта, вмещающего сваи, и после первого рабочего зимнего сезона температура грунта понизилась на $-0,5...-0,8$ °С (в абсолютных значениях до $-1...-2,1$ °С), что повлекло за собой увеличение несущей способности до 770 кН, или на 42 % по сравнению с фоновыми значениями.

В 2017 г. была опробована технология статического зондирования на полуострове Гыданский (Обская губа). Инженерно-геокриологические условия на площадке исследования характеризовались вечной мерзлотой сплошного распространения с твердомерзлыми грунтами (песками) и среднегодовой температурой грунта на глубине нулевых годовых амплитуд -6 °С. Существует широко распространенное мнение, что твердомерзлые грунты не являются предметом изучения для статического зондирования, поскольку «твердомерзлый грунт не давится зондом», только «пластичномерзлый» [7]. Поскольку на сегодня не существует опубликованных материалов, описывающих попытки испытаний статическим зондированием твердомерзлых грунтов, было проведено испытание для опровержения ошибочного мнения и подтверждения применимости статического зондирования на твердомерзлом песке при температуре -6 °С. Зонд, использованный при испытаниях, измерял следующие параметры: лобовое сопротивление, боковое трение, температуру, поровое давление и электрическое сопротивление. Результаты испытания приведены на рисунке.

Значения лобового сопротивления в мерзлом песке изменялись от 20 до 55 МПа, а бокового трения — от 100 до 600 кПа, что характеризует очень плотные пески. Значения удельной электропроводности (сопротивления) из-



Профиль статического зондирования в твердомерзлом песке

менялись между 0,0023 См/м (440 Ом·м) и 0,0705 См/м (14 Ом·м). Важно отметить, что на глубине от 3 до 3,7 м электропроводность повышается, что интерпретируется как увеличение засоленности мерзлого песка. Среднее значение электропроводности в данном интервале равно 0,03 См/м, что соответствует электрическому сопротивлению 45 Ом·м. Это значение выше (ниже) по сравнению с электропроводностью (сопротивлением) для песка, залегающего ниже по разрезу, равной 0,0037–0,0093 См/м (273–120 Ом·м). Такое увеличение засоленности в рассматриваемом интервале приводит к снижению лобового сопротивления q_c по сравнению со

значениями для песка, залегающего ниже, а именно в интервале засоленного мерзлого песка $q_c = 22...28$ МПа и $q_c = 36...48$ МПа — незасоленного. Данные соотношения соответствуют рекомендуемым значениям, приведенным в табл. В.9 СП 25.13330.2012.

Температура мерзлого грунта измерялась в соответствии с методикой, изложенной в работе [1]. Точность температурного датчика — 0,05 °С, а его цифровое разрешение — 0,001 °С. В процессе пенетрации зонд разогревается из-за трения поверхности зонда о грунт. В мерзлых грунтах теплота разогрева существенно меньше, чем в немерзлых. Это влечет за собой боль-

шое сокращение времени на температурную стабилизацию зонда в мерзлых грунтах по сравнению со временем в немерзлых, что является огромным преимуществом применения статического зондирования для измерения температуры в мерзлых грунтах.

На профиле лобового сопротивления, полученном с помощью статического зондирования (см. рисунок), на глубине 1 м виден резкий переход от 1 МПа к 24 МПа, что интерпретируется как переход от талого к мерзлому состоянию грунта (глубина сезонного оттаивания). Это подтверждено температурным замером на данной глубине, где температура грунта близка к 0 °С. На глубине 7 м замерен температурный минимум, равный –6 °С. Ниже температура грунта постепенно повышается, достигая значения –5,71 °С на глубине 9 м. Полученный температурный профиль полностью согласуется с современными теоретическими представлениями о температурном режиме многолетнемерзлых грунтов в слое нулевых годовых амплитуд температуры.

Геотехнический мониторинг

Геотехнический мониторинг инженерных сооружений, построенных на многолетнемерзлых грунтах, имеет очень большое значение для их безопасной эксплуатации. Многолетнемерзлый грунт очень чувствителен к перепадам температуры и засоленности, что обычно вызвано изменением климата и техногенным воздействием. Таким образом, велика востребованность технологии геотехнического мониторинга, которая основывается на необходимых и достаточных данных о мерзлом состоянии грунтового основания под наблюдаемым инженерным сооружением.

В настоящее время большинство инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах по-

строено на свайных основаниях. Далее рассмотрим состояние свайного основания в многолетнемерзлом грунтовом массиве.

Классификация состояния мерзлого грунтового основания по отношению к свайным фундаментам. Состояние мерзлого грунтового основания по отношению к свайным фундаментам можно разделить на следующие четыре стадии.

1. **Нормальное состояние** (видимых проблем не обнаружено). Проектная несущая способность сваи соответствует (равна) фактической несущей способности, что, как правило, превышает нагрузку, передаваемую от сооружения на сваю. Температурный режим грунтового основания также соответствует проектному, который, в свою очередь, либо близок к температурному режиму в естественном состоянии, либо холоднее (применение охлаждающих установок). Принято считать, что если температура мерзлого грунтового основания поддерживается на определенном постоянном уровне, то проблем от вечной мерзлоты ожидать не стоит.

2. **Ослабленное состояние** (видимых проблем не обнаружено). Наступает в силу небольшого увеличения температуры грунтов или каких-либо других причин, что влечет за собой небольшое ослабление мерзлых грунтов. Фактическая несущая способность сваи меньше проектной, но все еще превышает нагрузку, передаваемую от сооружения на сваю.

3. **Слабое состояние** (обнаружены небольшие нарушения (трещины), небольшие осадки отдельных свай). Происходит вследствие продолжающегося ослабления грунта и достигает той точки, когда наступают пластические деформации мерзлого грунта, небольшие осадки некоторых свай, фактическая несущая спо-

собность сваи равна нагрузке, передаваемой от сооружения, а нагрузки начинают перераспределяться на соседние сваи с относительно большей несущей способностью. Перераспределение нагрузок препятствует разрушению инженерного сооружения, однако небольшие нарушения (трещины) могут начинать образовываться и быть видимыми. Проектная температура грунта меньше фактической.

4. **Аварийное состояние** (обнаружены критические деформации и осадки свай). Наступает, когда фактическая несущая способность сваи меньше нагрузки, передаваемой от сооружения. В этом случае наблюдаются осадка инженерного сооружения, а значительные деформации и разрушения приводят к нарушению целостности инженерного сооружения и прекращению его эксплуатации.

Представленная классификация позволяет точно определить следующие меры инженерной защиты наблюдаемых грунтовых оснований и сооружений.

Нормальное состояние — дополнительных мер по инженерной защите грунтового основания и сооружений не требуется.

Ослабленное состояние — обычно требует малозатратных мер и решений по инженерной защите, которые направлены на не прямое улучшение состояния грунтового основания, но не самого инженерного сооружения, таких как:

- применение теплоизоляционных материалов;
- корректировка работы уже установленных термостабилизаторов;
- контроль стока поверхностных вод;
- изменение схемы очистки поверхности грунта от снега на территории, вблизи от инженерного сооружения;
- обнаружение и устранение

протечек воды из системы водоснабжения/водоотведения инженерного сооружения.

Слабое состояние — требуются дорогостоящие меры и решения по инженерной защите, которые направлены на прямое улучшение состояния как грунтового основания, так и самого инженерного сооружения:

- применение дополнительных термостабилизаторов;
- укрепление конструкции сооружения с помощью дополнительных опор, подпорных устройств и др.;
- укрепление ростверка фундамента;
- установка дополнительных свай и др.

Аварийное состояние — меры инженерной защиты не рассматриваются. Полная остановка эксплуатации сооружения и последующий его снос.

Методы геотехнического мониторинга инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах можно классифицировать на три группы: геодезический, структурный и температурный.

Геодезический мониторинг использует такой метод, как 3D лазерное сканирование, а также предусматривает применение тахеометра, гидравлического уровня и др. При геодезическом мониторинге измеряют расстояния, углы, координаты и т. д. по отношению к точке отсчета через определенный период времени. Сравнение полученных результатов дает оценку, произошло ли смещение сооружения и насколько. Эти методы измеряют деформацию (смещение) сооружения, что происходит только в слабом или аварийном состоянии мерзлого грунтового основания. Геодезический мониторинг не в состоянии предсказать, начнутся деформации основания или нет. Другими словами, не применяется в нормальном и ослабленном состоянии, поскольку

деформаций и осадок на этих стадиях не происходит.

Структурный мониторинг включает методы, использующие датчики деформации и/или тензометры (динамометры), которые устанавливаются в структурные элементы сооружения для геотехнических целей, либо внутри свай, либо на контакте между оголовком свай и непосредственно самого сооружения. Датчики измеряют деформации, которые испытывает материал свай, а тензометры — нагрузку, передаваемую от сооружения на сваю. Анализ напряженно-деформированного состояния структуры сооружения и распределение нагрузок на сваи позволяют определить, когда критические деформации достигнуты и начинается перераспределение нагрузок на сваи, что соответствует слабому или аварийному состоянию мерзлого грунтового основания. Однако как и в случае геодезического мониторинга, эти методы не позволяют идентифицировать нормальное и ослабленное состояние мерзлого грунтового основания и спрогнозировать будущие деформации.

Температурный мониторинг мерзлого грунтового основания обычно ограничен температурными наблюдениями в термометрических скважинах, установленных около свай и/или термостабилизаторов. Он отслеживает температурный режим мерзлого грунтового основания и сегодня является самым распространенным видом мониторинга в геотехнике на многолетнемерзлых грунтах. Если температура грунтов не выходит за пределы проектных значений, их состояние принято считать нормальным. Если же температура грунтов выше проектных значений, тогда, основываясь на субъективном мнении экспертов, разрабатывают специальные меры и решения по инженерной защите сооружений.

Важно отметить, что обычно не производится дополнительных исследований грунтов *in situ*, и в большинстве случаев применяются неправильные и/или неадекватные меры по инженерной защите, которые нередко становятся причиной негативных последствий для эксплуатации сооружения, что приводит к необоснованным большим материальным и финансовым затратам. При отсутствии мер по инженерной защите, состояние мерзлого грунтового основания часто достигает аварийного, что приводит к потере инженерного сооружения. Следовательно, температурный мониторинг — необходимая часть геотехнического мониторинга на мерзлоте, однако его недостаточно для диагностики состояния грунтового основания и правильного выбора мер и решений по инженерной защите сооружений.

Таким образом, существующие методы геотехнического мониторинга мерзлых грунтовых оснований инженерных сооружений не позволяют диагностировать потерю несущей способности свай на начальном этапе, спрогнозировать тренд потери несущей способности до начала развития деформации основания и определить подходящие и обоснованные меры и решения по инженерной защите.

Применение статического зондирования для геотехнического мониторинга

В 2016 г. НИИОСП им. Н. М. Герсеевича выпустил СТО 365-54501-049-2016 «Применение статического зондирования для контроля оснований в районах распространения многолетнемерзлых грунтов». В стандарте приведено применение статического зондирования на многолетнемерзлых грунтах в целях мониторинга, диагностики и контроля мерзлых грунтовых оснований.

Для статического зондирования мерзлых грунтов группа компаний «Фугро» рекомендует использование специального зонда, который позволяет измерить в одно испытание (задавливание) следующие параметры:

- q_c — лобовое сопротивление или сопротивление наконечника зонда вдавливаю в грунт, МПа;
- f_s — боковое трение или трение муфты зонда в процессе его вдавливания в грунт, МПа;
- T — температуру грунта, °С;
- u_2 — поровое давление, кПа;
- K — электропроводность грунта, См/м.

На основе полученных данных с помощью перечисленных датчиков определяются следующие характеристики:

- температура грунта (прямое измерение);
- засоленность грунта, рассчитанная на основе результатов по электропроводности;
- несущая способность сваи и механические свойства (деформационные и прочностные), рассчитанные по СТО 36554501-049-2016;
- длительная несущая способность сваи, определенная по методике [8].

Для геотехнического мониторинга испытание статическим зондированием мерзлого грунтового основания необходимо производить периодически, в заранее определенных локациях на стадиях изысканий, строительства и эксплуатации инженерного сооружения. Периодичность испытаний может быть установлена один раз в год, в три года или пять лет, в зависимости от инженерно-геокриологических условий площадки. Полученные ре-

зультаты сравниваются с результатами предыдущих испытаний, т. е. оценивается изменение температуры, засоленности, несущей способности сваи и др. Если один из параметров последовательно (устойчиво) изменяется, следует рассматривать меры по инженерной защите. Далее по результатам геотехнического мониторинга на основе технологии статического зондирования приведем пример анализа несущей способности сваи (НСС), где на основе соотношения измеренной несущей способности сваи, нагрузки на сваю (НС) и проектной НСС произведена оценка состояния мерзлого грунтового основания.

Состояние мерзлого грунтового основания:

- *нормальное* — НСС близко или превышает ее проектное значение;
- *ослабленное* — НСС меньше ее проектного значения, но выше проектного значения НС;
- *слабое* — НСС меньше ее проектного значения и близко к проектному значению НС;
- *аварийное* — НСС меньше проектного значения НС.

Таким образом, статическое зондирование на мерзлых грунтах — это единственный на сегодня метод, который может определить деградацию мерзлого грунтового основания на ранней стадии.

Эта деградация может быть вызвана повышением температуры мерзлых грунтов и/или изменением их засоленности. Другие методы не в состоянии определить, когда и в какой степени мерзлое грунтовое основание начинает деградировать.

Использование статического зондирования позволяет спрогнозировать, при каких условиях наступит слабое состояние мерзлого грунтового основания, поскольку выполняются не только измерение температуры грунтов, но и оценка засоленности, механических свойств грунтов и несущей способности сваи.

Вывод

В последние годы в России на различных стадиях (изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация) активно реализуются крупные проекты, связанные со строительством инженерной инфраструктуры, расположенные вдоль Арктического побережья в области распространения многолетнемерзлых засоленных грунтов. Деградация мерзлоты, вызванная техногенными факторами и/или изменением климата, представляет собой большой вызов Арктической инфраструктуре. Даже небольшое увеличение температуры мерзлого грунта и/или его засоленности может существенно снизить показатели механических свойств грунтов и несущую способность свай.

На сегодняшний день статическое зондирование — единственный метод, позволяющий проводить мониторинг и диагностику состояния мерзлого грунтового основания. В свою очередь, подлинная информация о состоянии мерзлого грунтового основания позволит принять правильное и надлежащее решение для сохранения инженерного сооружения и предотвращения необоснованных материальных и финансовых затрат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков Н. Г., Соколов И. С. Сравнение температурных замеров грунтов с помощью статического зондирования и скважинной // Инженерные изыскания. 2018. № 7–8. Т. XII. С. 16–24.
2. Lunne T., Robertson P. K., Powell J. J. Cone penetration testing in geotechnical practice [Статическое зондирование в геотехнической практике]. London and New York, Spon Press, 2004. 312 p.
3. Volkov N., Sokolov I., Jewell R. Investigation by cone penetration tests of piled foundations in frozen soil

maintained by thermosyphons [Исследования с помощью статического зондирования свайных оснований в мерзлых грунтах, охлаждаемых термостабилизаторами] // American Scientific Research Journal for Engineering. Technology and Sciences. 2017. Vol. 31. No 1. Pp 40–58.

4. Фотиев С. М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли. 1999. № 2. Т. III. С. 40–65.
5. Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов. М. : МАИК Наука/Интерпериодика, 2002. 426 с.
6. Vyalov S. S. Rheological fundamentals of soil mechanics [Реологические основы механики грунтов]. Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo, Elsevier Science Publishers B. V., 1986. 564 p.

dam – Oxford – New York – Tokyo, Elsevier Science Publishers B. V., 1986. 564 p.

7. Рыжков И. Б., Исаев О. Н. Статическое зондирование грунтов. М. : АСВ, 2010. 496 с.
8. Волков Н. Г. Методика расчета несущей способности свай в многолетнемерзлых грунтах на основе измерений релаксации напряжения, полученных с помощью статического зондирования // Сб. докладов Междунар. науч.-техн. конф. «Современные технологии проектирования и строительства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах». М., 2018. С. 36–42.

REFERENCES

1. Volkov N. G., Sokolov I. S. Comparison of soil temperature measurement by cone penetration testing and temperature logging in monitoring. *Inzhenernye izyskaniya*, 2018, no. 7–8, vol. XII, pp. 16–24. (In Russian).
2. Lunne T., Robertson P. K., Powell J. J. *Cone penetration testing in geotechnical practice*. London and New York, Spon Press, 2004. 312 p.
3. Volkov N., Sokolov I., Jewell R. Investigation by cone penetration tests of piled foundations in frozen soil maintained by thermosyphons. *American Scientific Research Journal for Engineering. Technology and Sciences*, 2017, vol. 31, no. 1, pp 40–58.
4. Fotiev S. M. Patterns in the formation of ion-salt composition in natural water of Yamal peninsula. *Kriosfera zemli*, 1999, no. 2, vol. III, pp. 40–65. (In Russian).
5. Roman L. T. *Mekhanika merzlykh gruntov* [Mechanics of Frozen Soils]. Moscow, MAIK Nauka/Interperiodika Publ., 2002. 426 p. (In Russian).
6. Vyalov S. S. *Rheological fundamentals of soil mechanics*. Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo, Elsevier Science Publishers B. V., 1986. 564 p.
7. Ryzhkov I. B., Isaev O. N. *Staticheskoe zondirovanie gruntov* [Cone penetration testing of soils]. Moscow, ASV Publ., 2010. 496 p. (In Russian).
8. Volkov N. G. Calculation of pile bearing capacity on permafrost soils based on stress relaxation measurement by cone penetration testing. *Sbornik докладов Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Sovremennye tekhnologii proektirovaniya i stroitel'stva fundamentov na mnogoletnemerzlykh gruntah"* [Proc. International scientific-technical conference "Modern technologies of foundation design and construction on permafrost"]. Moscow, 2018, pp. 36–42. (In Russian).

Для цитирования: Волков Н. Г., Соколов И. С. Геотехнический мониторинг мерзлого грунтового основания с помощью статического зондирования // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 5. С. 52–59. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.05.52-59.

For citation: Volkov N. G., Sokolov I. S. Geotechnical Monitoring of Frozen Earth Foundation by Cone Penetration Test. *Proyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2019, no. 5, pp. 52–59. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2019.05.52-59. ■