

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи



Соколов Иван Сергеевич

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ
МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ СТАТИЧЕСКИМ ЗОНДИРОВАНИЕМ**

Специальность 25.00.08 - Инженерная геология, мерзлотоведение и
грунтоведение

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Научные руководители:

кандидат геол.-мин. наук
Исаев Владислав Сергеевич

кандидат геол.-мин. наук
Волков Николай Генрихович

Москва – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И МЕТОДЫ ИХ ИЗУЧЕНИЯ	8
1.1 Основные характеристики мерзлых грунтов в инженерной геокриологии.....	8
1.2 Специфика механики мерзлых грунтов	12
1.3 Существующие методы изучения механических свойств мерзлых грунтов.....	16
Выводы.....	30
ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГРУНТОВ	32
2.1 Общее описание метода статического зондирования.....	32
2.2 Виды установок для статического зондирования.....	34
2.3 Виды зондов статического зондирования.....	40
2.4 Опыт применения статического зондирования в мерзлых грунтах	48
Выводы.....	58
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ С ПОМОЩЬЮ ЗОНДА С ТЕМПЕРАТУРНЫМ ДАТЧИКОМ	59
3.1 Существующая методика замера температуры мерзлого грунта	59
3.2 Характеристика площадки для сравнительных замеров температуры грунтов.....	60
3.3 Сравнительные замеры температуры мерзлого грунта с помощью зонда статического зондирования с температурным датчиком и скважинной термометрии	62
3.4 Описание разрабатываемой методики замера температуры с помощью статического зондирования	66
Выводы.....	75
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕРЗЛОГО ГРУНТА МЕТОДОМ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	76
4.1 Теоретическое обоснование применения уравнений длительной прочности к измеряемым значениям лобового сопротивления и бокового трения при релаксационном испытании	76
4.2 Особенности полевого испытания мерзлых грунтов статическим зондированием	79
4.3 Обработка данных статического зондирования со стабилизацией	80
Выводы.....	98
ГЛАВА 5. ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ.....	99
5.1 Геокриологические условия территории применения разработанной методики	99
5.2 Опыт статического зондирования на твердомерзлых грунтах	104
5.3 Определение длительной прочности различных типов мерзлых грунтов.....	105
5.4 Определение несущей способности свай в мерзлом грунте и сравнение с существующими методиками расчета несущей способности свай.....	107
5.5 Сравнение расчета несущей способности свай с результатами испытания натурной свай статической нагрузкой.....	112

Выводы	115
ГЛАВА 6. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ.....	116
6.1 Оценка эффективности работы термостабилизаторов по данным статического зондирования	116
6.2 Диагностика состояния мерзлого грунтового основания.....	128
6.3 Инженерно-геокриологический мониторинг за состоянием мерзлых грунтов.....	132
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	137
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	138
СПИСОК ИЛЛЮСТРАЦИЙ.....	145
СПИСОК ТАБЛИЦ.....	149

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Интенсивное освоение арктических территорий, строительство, развитие инфраструктуры северных городов требует привлечения новых современных технологий строительства, для которых, в свою очередь, необходимо использование более точных и детальных методов инженерных изысканий и геотехнического мониторинга. Основными методами изучения свойств мерзлых грунтов являются: инженерно-геологическое бурение скважин, термометрия в скважинах, геофизические исследования, лабораторные методы определения физико-механических свойств и испытания свай статическими или динамическими нагрузками. Метод статического зондирования грунтов широко применяется для изучения немерзлых дисперсных грунтов, в частности для оценки их прочностных и деформационных свойств. Для изучения мерзлых грунтов метод статического зондирования практически не используется. Это обусловлено как сравнительно небольшим опытом проведения испытаний, так и отсутствием методов обработки и интерпретации данных статического зондирования в специфических условиях мерзлых грунтов. В связи с этим возникает необходимость разработки новых методик статического зондирования и обработки получаемых данных, которые будут учитывать специфику механики дисперсных мерзлых грунтов.

Степень разработанности темы исследования. Результаты исследований, касающиеся применения полевых испытаний мерзлых грунтов статическим зондированием, представлены в работах Ф.Е. Волкова, Л.Н. Воробкова, О.Н. Исаева, Б. Ладанного, Т. Лунна, А. МакКаллума, М.А. Минкина, Ю.Г. Трофименкова, Р. Фортъе и других авторов.

Природа и особенности реологических свойств грунтов отражена в работах А. Бишопа, С.С. Вялова, М.Н. Гольдштейна, С.Е. Гречищева, Ю.К. Зарецкого, Р.С. Зиангирова, А.Ю. Ишлинского, Р.Г. Кальбергена, В.А. Королёва, М. Рейнера, Л.Т. Роман, А. Скемптона, Н.А. Цытовича и других авторов.

Цель работы — определение величины длительной прочности мерзлых грунтов на сжатие и сдвиг в полевых условиях методом статического зондирования.

Задачи работы:

1. Выполнить анализ и обобщение опубликованных материалов по теме механики мерзлых грунтов, включая испытания мерзлых грунтов методом статического зондирования.
2. Разработать методику исследования мерзлых грунтов статическим зондированием для определения их длительной прочности.
3. Выполнить полевые исследования мерзлых грунтов с помощью статического зондирования в соответствии с разработанной методикой.
4. Выявить особенности кривой релаксации напряжения, вызванного внедрением зонда в мерзлый грунт в процессе испытания в режиме «стабилизации».
5. Провести проверку разработанной методики в полевых условиях путем сравнения результатов определения несущей способности сваи по статическому зондированию и по испытанию натурной сваи статической вдавливающей нагрузкой.

Объектом исследования являются многолетнемерзлые дисперсные грунты различного состава и генезиса, находящиеся в зоне инженерно-строительного воздействия и распространенные на площадках в районе городов Воркута, Лабытнанги, Новый Уренгой, Салехард и севера полуострова Гыданский.

Предметом исследования является релаксация напряжения в массиве мерзлых грунтов, вызванного внедрением зонда (металлического индентора).

Фактический материал получен автором лично в 2015–2019 гг. в ходе проведения полевых испытаний мерзлых грунтов статическим зондированием в рамках учебной практики МГУ в районе г. Воркута и производственных инженерно-геологических изысканий на различных строительных площадках севера Западной Сибири, выполненных ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС» (международная группа компаний Фугро).

Научная новизна работы заключается в следующих результатах:

1. Впервые выполнены полевые исследования твердомерзлых грунтов и мерзлых грунтов, подвергшихся искусственному охлаждению термостабилизаторами, на площадках, различных по геокриологическим условиям, с измерением релаксации напряжений под наконечником зонда и по муфте трения.
2. Разработана новая методика проведения статического зондирования мерзлого грунта с остановками зонда для измерения релаксации напряжений (зондирование со стабилизацией), которая позволяет определять значения длительной прочности для любого заданного промежутка времени.
3. Установлено и показано разделение получаемой кривой релаксации напряжения на два участка, что позволяет получить однозначное решение уравнения длительной прочности мерзлого грунта для конкретного замера в режиме релаксации напряжений (зондирование со стабилизацией).
4. Разработана новая методика обработки данных для определения длительной прочности мерзлых грунтов на сжатие и сдвиг при статическом зондировании со стабилизацией.
5. Разработано приложение к программе сбора полевых данных, позволяющее в полевых условиях определять длительную прочность путем построения опережающей кривой для данных о температуре и длительной прочности, что позволяет точно установить величину длительной прочности на сжатие и сдвиг (II участок опытной кривой релаксации напряжения), а также оптимизировать время замера температуры грунтов.
6. В результате опытной проверки разработанной методики выявлено совпадение данных несущей способности свай, полученных при испытании статическим зондированием в непосредственной близости от нее, с данными, полученными в ходе испытаний свай статической вдавливающей нагрузкой.

Практическое значение диссертационной работы:

Разработанная методика исследования свойств мерзлых грунтов с помощью статического зондирования использована в научной и производственной деятельности компании «ГЕОИНЖСЕРВИС» (международная группа компаний Фугро) при выполнении полевых испытаний мерзлых грунтов и камеральной обработке результатов инженерно-

геологических изысканий для различных объектов, среди которых мост через р. Обь в районе города Салехард, участок железной дороги Обская-Салехард (подход к мосту в пойме р. Обь), а также другие объекты капитального строительства в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Впервые проведены полевые испытания мерзлых грунтов методом статического зондирования не только для научных исследований, но и для получения исходных данных о свойствах грунтов для целей промышленного и гражданского строительства. Автором проведены показательные испытания грунтов статическим зондированием с измерением температуры в ходе выполнения студентами Воркутинской и Звенигородской полевых инженерно-геокриологических практик Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Личный вклад. Все основные результаты исследований, приведенные в защищаемой диссертации, получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Автором выполнены полевые испытания мерзлых грунтов с помощью статического зондирования, проведена обработка материалов и разработана новая методика статического зондирования для исследования мерзлых грунтов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разделение получаемого опытного графика релаксации напряжений на два участка с помощью опережающей кривой позволяет задать критерий стабилизации и достичь его выполнения в полевых условиях. Разработанный подход впервые позволяет однозначно определить эмпирические коэффициенты уравнения длительной прочности.

2. Новая методика проведения полевых испытаний мерзлых грунтов статическим зондированием со стабилизацией позволяет определить значения их длительной прочности на сжатие и сдвиг. Особенность предложенной методики заключается в возможности определения длительной прочности мерзлых грунтов в массиве непосредственно в полевых условиях.

3. Расчет длительной несущей способности сваи в мерзлых грунтах по данным статического зондирования выполняется без использования эмпирических коэффициентов и для любого заданного промежутка времени. Предлагаемый расчет впервые позволяет провести прямое сравнение рассчитанной несущей способности сваи по результатам статического зондирования со значениями несущей способности, измеренной в ходе натурального испытания сваи статической нагрузкой. В расчете по результатам статического зондирования длительная прочность рассчитывается на период приложения статической нагрузки в ходе натурального испытания сваи или на период эксплуатации сооружения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на 9 научно-практических конференциях и семинарах: XI International Conference on Permafrost, г. Потсдам, Германия, 20–24 июня 2016 г.; XI Международный симпозиум по проблемам инженерного мерзлотоведения, г. Магадан, 5–8 сентября 2017 г.; Семинар на кафедре геокриологии, геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, 15 ноября 2017 г.; День науки 2018, Звенигородская биостанция МГУ им. М.В. Ломоносова, 22–23 января 2018 г.; Московское общество испытателей природы, секция Инженерной геологии, г. Москва, 17 мая 2018 г.; 4th International Symposium on Cone Penetration Testing 2018 (CPT'18), г. Дельфт, Нидерланды, 21–23 июня 2018 г.; 5th European

Conference on Permafrost (EUCOP 2018), г. Шамони-Мон Блан, Франция, 23 июня – 1 июля 2018 г.; Научно-практическая конференция «Обдорья. Современные научные исследования в Арктике» (X юбилейная конференция), ЯНАО, г. Салехард, 26–27 ноября 2018 г.; Научно-техническая конференция «Современные технологии проектирования и строительства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах», г. Москва, 14–15 ноября 2018 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ общим объемом 10,1 п.л., в том числе 3 статьи (объемом 3,8 п.л.) в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из общей характеристики работы, 6 глав, основных выводов и списка литературы. Содержит 149 стр. машинописного текста, 78 рисунков и 13 таблиц. Список литературы включает 112 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и признательность к.г.-м.н. Н.Г. Волкову и к.г.-м.н., старшему научному сотруднику кафедры геокриологии геологического факультета МГУ В.С. Исаеву за руководство на всех этапах подготовки работы от теоретических основ метода до проведения полевых исследований, ценные советы и замечания. Автор искренне признателен коллективу ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС», директору Д.А. Ванькову за всестороннюю поддержку проводимой работы и старшему оператору статического зондирования А.М. Бузеку за высочайший профессионализм в ходе пионерных испытаний мерзлых грунтов. Автор выражает благодарность за неоценимую помощь и содействие в организации полевых исследований директору Научного центра изучения Арктики (г. Салехард), к.г.-м.н. А.И. Синицкому, а также магистранту Д.В. Лагоше за помощь в обработке полевых данных. Автор искренне признателен профессорам кафедры геокриологии д.т.н. Л.Н. Хрусталеву и д.г.-м.н. И.А. Комарову и доцентам к.г.-м.н. С.Н. Булдовичу и к.г.-м.н. Г.И. Гордеевой за ценные советы и рекомендации, а также благодарен всем сотрудникам кафедры геокриологии за участие в обсуждении работы и содействие в процессе оформления диссертации. Особую благодарность автор выражает к.г.-м.н. И.А. Бражнику за оказанную помощь, ценные советы и рекомендации, полученные в процессе написания и оформления диссертации. Поклон моим родным и близким за поддержку, терпение и веру в меня на всех этапах этого исследования.

ГЛАВА 1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И МЕТОДЫ ИХ ИЗУЧЕНИЯ

1.1 Основные характеристики мерзлых грунтов в инженерной геокриологии

В работе используется определение термина «мерзлый грунт» согласно ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация» [70]. Мерзлый грунт — это грунт, имеющий отрицательную или нулевую температуру, содержащий в своем составе видимые ледяные включения и (или) лед-цемент, и характеризующийся криогенными структурными связями.

Выделяют следующие грунты, находящиеся при отрицательной температуре, но не имеющие сформированных льдом структурных связей [26, 45]:

- сыпучемерзлый грунт — крупнообломочный и песчаный грунт, имеющий отрицательную температуру, но не сцементированный льдом,
- морозный грунт — скальный грунт, имеющий отрицательную температуру и не содержащий в своем составе лед, и незамерзшую воду,
- охлажденный грунт — засоленный грунт, отрицательная температура которого выше температуры начала его замерзания.

Морозные грунты не являются предметом исследования для метода статического зондирования. Охлажденные грунты, в отличие от морозных, являются предметом исследования, но к этому типу грунтов применима стандартная методика статического зондирования. Особое место для статического зондирования занимают сыпучемерзлые грунты. Для них необходимо выработать отдельную методику проведения статического зондирования, отличную от методики для мерзлых и немерзлых грунтов.

Мерзлые грунты в свою очередь классифицируются на многолетнемерзлые (находящиеся в мерзлом состоянии постоянно в течение трех и более лет) и сезонномерзлые (находящиеся в мерзлом состоянии периодически в течение холодного сезона) [26, 45]. Для статического зондирования данное разделение не принципиально, поскольку возможности статического зондирования ограничены только плотностью упаковки частиц грунта, его гранулометрическим составом и структурными связями.

Криогенная текстура мерзлого грунта классифицируется на массивную, слоистую, сетчатую и корковую. Отдельно криогенная текстура не является предметом исследования для статического зондирования, однако, известно, что она существенно влияет на механические свойства мерзлых грунтов. При испытании многолетнемерзлых грунтов (ММГ) метод статического зондирования чувствителен к повторножильным льдам и горизонтальным шлирам льда, и при превышении некоторой критической толщины шлиров льда хорошо их фиксирует.

В зависимости от количества льда в объеме грунта ММГ делятся на следующие категории [46, 70]:

- сильнольдистые (содержание льда более 50%),
- льдистые (содержание льда от 25% до 50%),
- слабольдистые (содержание льда менее 25%).

Сильнольдистые грунты содержат повышенное содержание льда, как в поровом пространстве, так и в виде ледяных включений (шлиры, жилы). Они характеризуются повышенной сжимаемостью в мерзлом состоянии. В случае превышения общей влажности грунта влажности предела текучести при оттаивании приобретают текучую консистенцию, а при превышении предела пластичности – пластичную консистенцию. Это обуславливает их просадочность и малую несущую способность при оттаивании. При сохранении мерзлого состояния для них также характерно низкое значение предела длительной прочности. Лёдистые грунты содержат меньшее количество льда. Их свойства в мерзлом и оттаявшем состоянии будут зависеть от литологического состава и значения общей влажности по отношению к значениям влажности пределов текучести и пластичности грунта. Слабльдистые грунты содержат относительно небольшое количество ледяных включений. При оттаивании слабльдистые грунты обычно имеют малую сжимаемость.

В ГОСТ 25100-2011 [70] приводятся другие классификации мерзлых грунтов по лёдистости для скальных, дисперсных и песчаных грунтов. Например, классификация по видимым включениям льда разделяет мерзлые дисперсные грунты на 5 видов: нельдистый, слабльдистый, лёдистый, сильнольдистый, очень сильнольдистый.

Для статического зондирования данное разделение по лёдистости не накладывает специальных условий или ограничений. Выявлено, что чистый лёд толщиной 40 см не был препятствием для проникновения зонда (индентора). В свою очередь лёдистость мерзлого грунта безусловно влияет на показания, считываемые при статическом зондировании.

Все мерзлые грунты принято разделять по физическому состоянию на две категории: твердомерзлые и пластичномерзлые [1, 2]. Твердомерзлый грунт – дисперсный грунт, прочно сцементированный льдом, характеризуемый относительно хрупким разрушением, практически несжимаемый под внешней нагрузкой. Пластичномерзлый грунт – дисперсный грунт, сцементированный льдом, обладающий вязко-пластичными свойствами и сжимаемостью под внешней нагрузкой. В соответствии с ГОСТ 25100-2011 [70] разделение ММГ на пластичномерзлые и твердомерзлые производится на основе коэффициента сжимаемости m_{vf} $0,01 \text{ МПа}^{-1}$, где твердомерзлые грунты обладают коэффициентом $m_{vf} \leq 0,01 \text{ МПа}^{-1}$, а пластичномерзлые — $m_{vf} > 0,01 \text{ МПа}^{-1}$ [70, Табл. Б.32]. Данное разделение четкое и не имеет противоречий. Однако следует дать более точное определение используемых терминов.

Общепринято мнение, что пластичномерзлый грунт обладает пластичными свойствами, а твердомерзлый характеризуется хрупким разрушением. В таком случае логично, твердомерзлые грунты назвать «хрупкомерзлыми», ведь слова «хрупкий» и «пластичный» являются антонимами. Однако, слово «хрупкий» ассоциируется со словами «непрочный, недолговечный», что не соответствует природе твердомерзлого грунта. В связи с чем, в качестве более точного определения, было выбрано слово «твердый».

В свою очередь, слово «твердый» имеет несколько значений. Применительно к материи, этих значений два.

Первое значение — это фазовое состояние в ряду твердый–жидкий–газообразный. Скорее всего именно это значение слова «твердый» имелось в виду при выборе альтернативы слову «хрупкий». В частности, твердомерзлое состояние грунтов обычно достигается с

понижением температуры, когда большая часть содержащейся в них воды замерзает и переходит в твердое состояние [46]. В случае такого прочтения слова «твердый», «пластичномерзлый» необходимо заменить на «жидкомерзлый», что очевидно не подходит для описания мерзлого грунта.

Второе значение — это характеристика твердости материала. Твердость — свойство материала сопротивляться внедрению более твердого тела (индентора). Твердость определяется как отношение величины нагрузки к площади поверхности, площади проекции или объему отпечатка. Антоним слову «твердый» в данном значении будет слово «мягкий». Очевидно, что термин «мягкомерзлый» тоже не подходит для описания мерзлого грунта.

Следует отметить, что в терминологии инженерного мерзлотоведения (permafrost engineering) на английском языке деление на пластичномерзлый и твердомерзлый отсутствует. Термины «plastic frozen» и «hard frozen», что является прямым переводом с русского на английский язык, также не встречается в опубликованной иностранной литературе.

Отдельно стоит сказать о соотношении рассматриваемых характеристик — «твердый–мягкий» и «хрупкий–пластичный». Материал может быть охарактеризован по этим двум шкалам. Приведем для примера материалы, сочетающих предельные характеристики. Всего их четыре:

1. Твердый и пластичный — сталь, железо;
2. Твердый и хрупкий — алмаз, чугун, стекло, горные породы;
3. Мягкий и пластичный — пластилин, глина;
4. Мягкий и хрупкий — галлий, медь, клубничное желе.

Как видно, материал может одновременно являться твердым и пластичным. Это касается и мерзлых грунтов. Учитывая, что разделение на твердомерзлые и пластичномерзлые основано на коэффициенте сжимаемости, который не характеризует ни твердость, ни пластичность, можно утверждать, что разделение на твердомерзлые и пластичномерзлые является допустимым по отношению к сжимаемости грунтов, но не отражает сути сопротивления этих грунтов разрушению.

При рассмотрении степени влияния других факторов на поведение мерзлых грунтов, важно отметить, что большое влияние на проявление свойств пластичности и хрупкости также оказывает температура. Так в ГОСТ 25100-2011 [70] приводится таблица, где указаны температуры перехода из пластичномерзлого состояния в твердомерзлое. Указанные температурные границы весьма ориентировочны и завышены, то есть пластично-мерзлое состояние отмечается при температуре ниже указанных пределов [46].

Температурная граница твердомерзлого состояния для засоленных грунтов будет ниже табличных значений (Таблица 1) и в каждом конкретном случае определяется в зависимости от содержания солей и их химического состава. Более точно состояние грунта должно устанавливаться по результатам испытаний на сжимаемость.

В работах [32, 48] приведено мнение о возможности применения статического зондирования только для пластичномерзлых грунтов. Это также отражено в СП 25.13330.2012 [78], Приложение Л.

Существует другое обстоятельство затрудняющее деление мерзлых грунтов по свойству пластичности. Очень большое влияние на проявление свойств пластичности и хрупкости оказывают скорость нагружения. При быстром нагружении более резко проявляется свойство хрупкости, а при медленном — свойство пластичности. Например, хрупкое стекло способно при длительном воздействии нагрузки при нормальной температуре получать остаточные деформации. Пластичные же материалы, такие как малоуглеродистая сталь, под воздействием резкой ударной нагрузки проявляют хрупкие свойства. При понижении температуры хрупкость материалов увеличивается, а при повышении температуры увеличивается свойство пластичности.

Таблица 1 — Разновидности состояния незасоленных мерзлых грунтов в соответствии с ГОСТ 25100-2011 [70]

Грунты	Разновидность грунтов		
	тврдомерзлый ($m_{vf} < 0,01 \text{ МПа}^{-1}$) при $T < T_h, \text{ }^\circ\text{C}$	пластичномерзлый ($m_{vf} > 0,01 \text{ МПа}^{-1}$) при $T, \text{ }^\circ\text{C}$	сыпучемерзлый при $T < 0, \text{ }^\circ\text{C}$
Скальные и полускальные	$T_h = 0$	—	—
Крупнообломочные	$T_h = 0$	$T_h < T < T_{bf}$ при $S_r < 0,8$	При $S_r \leq 0,15$, при $W_{tot} \leq 3 \%$
Пески гравелистые, крупные и средней крупности	$T_h = -0,1$		
Пески мелкие и пылеватые	$T_h = -0,3$		
Глинистые грунты:			
– супесь	$T_h = -0,6$	$T_h < T < T_{bf}$	При $S_r \leq 0,15$
– суглинок	$T_h = -1,0$		
– глина	$T_h = -1,5$		
Примечание: T_h – температурная граница тврдомерзлого состояния грунтов; T – температура грунта			

Время нагружения для мерзлых грунтов сильно различается в различных случаях: при испытаниях мерзлых грунтов (часы, дни, месяцы); а при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений на мерзлых грунтах (месяцы, годы, десятилетия).

В связи, с чем возможны ситуации, когда при испытаниях мерзлые грунты будут проявлять свойства хрупкости, а при воздействии сооружений — свойства пластичности.

Влияние фактора времени на деформируемость и прочность мерзлых грунтов рассматривает раздел науки под названием реология. Этому посвящен параграф 1.2.

Выводом к вышеизложенному является то, что разделение ММГ на тврдомерзлые и пластичномерзлые не отражает характер поведения грунтов при испытании статическим зондированием и при учете только степени упругой деформируемости материала упускаются из виду факторы пластического течения ММГ в виду реологических свойств. Это обусловлено в свою очередь его природной влажностью, льдистостью и характером структурных связей между его составляющими водой–льдом–минеральным скелетом.

1.2 Специфика механики мерзлых грунтов

Механические свойства мерзлых грунтов существенно отличаются от таковых у талых в силу наличия в составе льда. Лед, находясь на границе между классическими ньютоновскими жидкостями и твердыми телами, обладает свойствами характерными, как для твердых тел, так и для жидкостей. Это же свойство лед сообщает и грунтам, в составе которых присутствует. Главной особенностью механики грунтов, в составе которых присутствует ледяная составляющая является проявление реологических свойств при приложении или изменении нагрузки. Реологические свойства проявляются в виде ползучести, релаксации напряжений и уменьшения прочности при длительном воздействии нагрузок. Вещества и материалы обладают свойством ползучести, проявление которой зависит от вязкости. Течение жидкостей наблюдается за очень короткие промежутки времени, льда – за несколько лет, горных пород – за тысячелетия.

В мерзлых грунтах степень проявления реологических свойств обусловлена преобладающим характером внутренних структурных связей. Между минеральной частицей и связанной водой действуют силы электромагнитного взаимодействия диполей воды к электрически заряженной поверхности частиц. Силы электромагнитного взаимодействия направлены нормально к поверхности и определяют сопротивление отрыву молекул воды от поверхности частиц. На границе раздела твердой и жидкой фазы возникают также касательные силы сопротивления движению воды вдоль поверхности частиц. Поскольку прочность самих минеральных частиц больше прочности связи между минеральной частицей и водной оболочкой, то эту связь рассматривают как связку между минеральными частицами. В процессе замерзания грунтовой влаги уменьшается толщина пленок связанной воды, образуется новая поверхность раздела «лед – связанная вода», уменьшается расстояние между контактирующими твердыми элементами (минерал – минерал, минерал – лед). Величина сдвигающего напряжения, при котором возникает пластическое течение льда, не превышает 0,01 МПа. Таким образом, нагрузка практически любой величины обуславливает пластические течения льда и пленок незамерзшей воды, переориентировку кристаллов льда. Происходит перестройка структуры, вызывающая релаксацию напряжений и деформацию ползучести, т.е. изменение прочностных и деформационных характеристик мерзлого грунта во времени, при этом анизотропия льда на упругие свойства почти не влияет. Наличие в мерзлых грунтах льда, текучесть которого наблюдается уже при приложении очень малых нагрузок, а также незамерзшей воды обуславливает развитие реологических процессов, прямым проявлением которых будут ползучесть и релаксация напряжения, вызванная приложенной нагрузкой.

В процессе ползучести мерзлых пород одновременно могут проявляться упругие, вязкие и пластические свойства. Процесс деформирования может протекать с уменьшающейся, постоянной либо возрастающей скоростью. В первом случае он называется затухающей ползучестью, во втором и третьем – незатухающей. Изменение величины деформации во времени изображается при помощи построения кривой ползучести, разные участки которой характеризуют разное поведение грунта при приложении нагрузки.

Графически зависимость деформации от времени изображают в виде кривой незатухающей ползучести, на которой обозначены стадии развития деформаций в грунтах при

нагрузении (Рисунок 1). Деформация включает в себя условно-мгновенную деформацию γ_0 , которая возникает сразу после приложения нагрузки, участок АВ – затухающая ползучесть, далее участки ВС и СЕD, которые описывают процесс незатухающей ползучести. Для процесса незатухающей ползучести выделяется три стадии: I — стадия затухающей ползучести (участок АВ), II — стадия установившегося течения (участок ВС) и III — стадия прогрессирующего течения (участок CD). Установлено, что стадия III подразделяется на 2 этапа [15]: участок СЕ, на котором развивающаяся пластическая деформация еще не вызывает собственно разрушения, и участок ED, который связан с интенсивным нарастанием деформации, приводящей к разрушению.

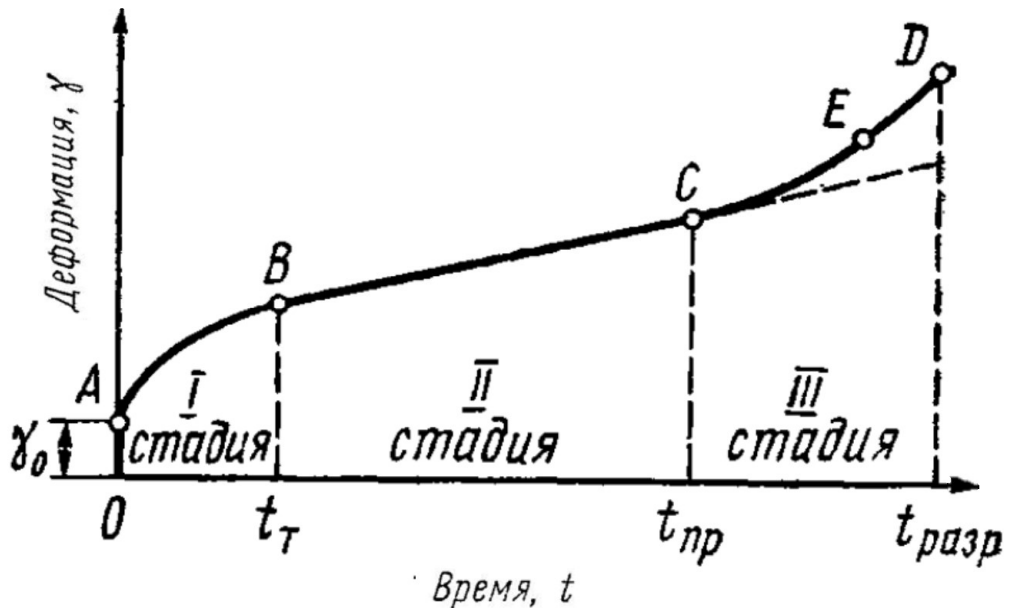


Рисунок 1 — Кривая незатухающей ползучести [14, 15]

Уменьшение величины разрушающего напряжения с увеличением времени до разрушения и есть проявление процесса уменьшения прочности во времени [15]. Этот процесс характеризуется кривой длительной прочности (Рисунок 2б).

Прочность на определенный момент времени (t) определяется на основе перестройки семейства кривых незатухающей ползучести, которые включают стадию III — прогрессирующего течения во времени (Рисунок 2а). Для получения кривой длительной прочности идентичные образцы испытываются при постоянной температуре под нагрузками $\tau_1 > \tau_2 > \tau_3 \dots$. Строится семейство кривых ползучести, и определяется время $t_1 < t_2 < t_3 \dots$, за которое разрушился каждый из образцов. Периоды времени от приложения нагрузки до разрушения t_1, t_2, t_3 , проектируются на ось абсцисс. На оси ординат откладываются соответствующие этим переходам значения разрушающих напряжений τ_1, τ_2, τ_3 . В результате такого построения получается зависимость между разрушающим напряжением и временем до разрушения — кривая длительной прочности (Рисунок 2б).

В ее пределах выделяют:

1. Условно-мгновенную прочность τ_0 — наибольшую прочность, характеризующую сопротивление материала быстрому разрушению; величина τ_0 определяется начальной ($t \rightarrow 0$) ординатой кривой длительной прочности;

2. Длительную прочность $\tau(t)$, определяемую напряжением, которое вызывает разрушение материала за заданный промежуток времени; величина $\tau(t)$ определяется текущей координатой кривой длительной прочности;
3. Предел длительной прочности, τ_∞ - соответствующий напряжению, до повышения которого деформация имеет затухающий характер, и разрушение не происходит при любом практически наблюдаемом времени воздействия нагрузки. Величина τ_∞ определяется асимптотой кривой длительной прочности.

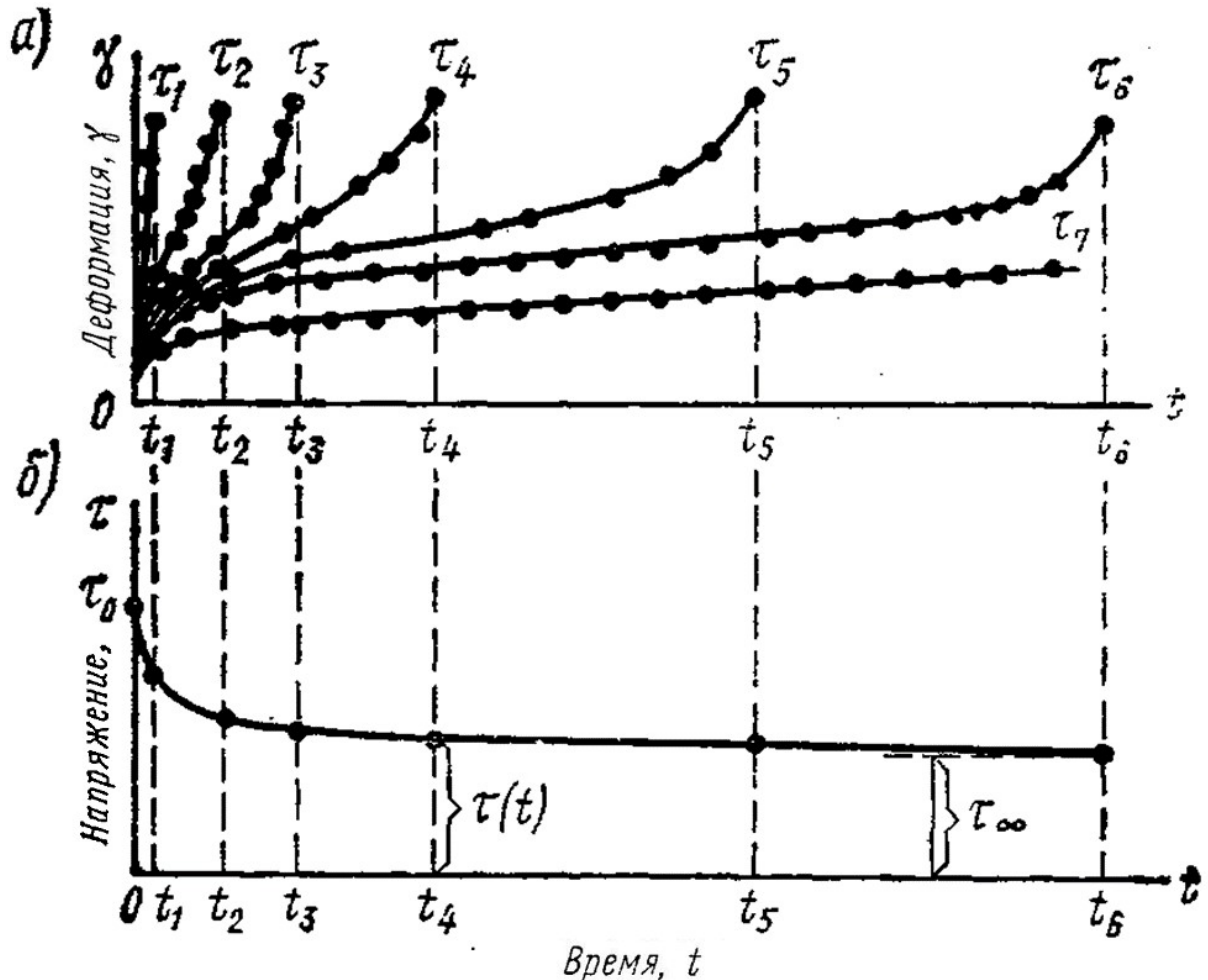


Рисунок 2 — Кривые ползучести (а) и кривая длительной прочности (б) [15]

У некоторых грунтов (например, льда, сильнольдистых грунтов при высокой отрицательной температуре и т.д.) незатухающая ползучесть, приводящая к разрушению, возникает при любых малых по величине напряжениях, и кривая длительной прочности асимптотически приближается к оси абсцисс.

Важными временными характеристиками реологических процессов являются время последействия T_p и время релаксации T_r . С определенной долей условности можно принять, что до превышения некоторого предела напряжения происходят только упругие деформации, а при достижении этого предела возникает упруговязкопластическое течение.

Связь между напряжением и упругой деформацией выражается уравнением последействия Кельвина-Фойхта:

$$\tau_i = G(\gamma^e) + \eta \dot{\gamma}_i^e \quad (1)$$

где G – модуль упругости сдвига; η – коэффициент вязкости.

Решая уравнение Кельвина-Фойхта относительно γ_i^e (при $\tau_i = \text{const}$) получим

$$\gamma_i^e = \frac{\tau_i}{G} (1 - e^{-t/T_p}) \quad (2)$$

где $T_p = \eta/G$ – время последействия.

Данное выражение описывает процесс запаздывания развития упругой деформации по сравнению с моментом приложения нагрузки (последействия).

Релаксация напряжений является одним из основных проявлений реологических свойств мерзлых грунтов. Процесс релаксации объясняется на примере проявления ползучести. Если под воздействием постоянного напряжения G за период времени t произошла деформация γ то, чтобы прекратить дальнейшее нарастание деформации, необходимо уменьшать напряжение F по закону $\Delta\sigma(t)$. Уменьшение во времени напряжения, необходимого для поддержания постоянной деформации, называется релаксацией напряжения. Релаксация рассматривается как процесс установления равновесия в физическом теле, когда микроскопические величины, воспринимающие напряжения, приближаются к своим равновесным значениям.

Для описания процесса релаксации используют уравнение Максвелла:

$$\dot{\gamma}_i = \frac{1}{\eta} \tau_i + \frac{1}{G} \dot{\tau}_i. \quad (3)$$

Если принять деформацию постоянной, то закон релаксации Максвелла запишется в виде:

$$\tau_i = \tau_{i(0)} \cdot e^{-t/T_r}, \quad (4)$$

где $\tau_{i(0)} = G\gamma_{i(0)}$ – начальное напряжение; $T_r = \eta/G$ – время (период) релаксации.

Величины T_p (время последействия) и T_r (время релаксации) формально равны одному и тому же значению η/G , но по физической сущности они различны, что вытекает из сопоставления уравнений Кельвина-Фойхта и Максвелла. Уравнение Кельвина-Фойхта характеризует упругое твердое тело, обладающее вязкостью. Свойством релаксации оно не обладает и при $\gamma_i = \text{const}$ уравнение трансформируется в закон упругости Гука.

Уравнение Максвелла характеризует вязкую жидкость, обладающую упругими свойствами. Свойством последействия это тело не обладает, и при $\tau_i = \text{const}$ течет с постоянной скоростью, трансформируясь в закон идеально вязкой жидкости Ньютона.

Время релаксации T_r является важным реологическим параметром. Если рассмотреть момент времени $t = T_r$, тогда уравнение выразится $\tau_i = \tau_{i0}/e$, и следовательно T_r представляет собой время, за которое напряжение τ_i уменьшится в e раз, по сравнению с начальным значением $\tau_{i(0)}$.

Таким образом, отчетливое проявление реологических свойств за короткий промежуток приложения нагрузки является характерным для ММГ и выделяет их отдельно среди других видов грунтов. Степень проявления реологических свойств зависит от физических характеристик мерзлого грунта (льдистости, влажности, криогенной текстуры). Реологические свойства характеризуются двумя взаимосвязанными параметрами: ползучестью и пределом длительной прочности [13, 14, 20, 21]. В данной работе рассматриваются различные виды

прочности ММГ, выделенные с помощью двух способов: путем измерения величин деформаций грунтов и остаточного напряжения в грунте при нагрузке, вызванной естественными или искусственно созданными условиями.

1.3 Существующие методы изучения механических свойств мерзлых грунтов

В силу зонального распространения многолетнемерзлых грунтов на планете и особенностей климата в регионах их распространения первоначальной областью хозяйственной деятельности человека являлись места, где мерзлые грунты отсутствуют или распространены слабо. На территории Европы многолетнемерзлые грунты отсутствуют почти полностью и поэтому не являлись объектом исследований на протяжении длительного времени. Однако, современные потребности человека заставляют его вести хозяйственную деятельность в регионах, где многолетнемерзлые грунты распространены (Рисунок 3). Особенно это актуально для нашей страны, территория которой в значительной степени находится в зоне распространения вечной мерзлоты и к ней приурочены многие месторождения полезных ископаемых.



Рисунок 3 — Карта распространения многолетнемерзлых пород в Северном полушарии

Методы лабораторного определения механических свойств мерзлых грунтов можно подразделить на прямые, косвенные и неразрушающие. К прямым методам лабораторных испытаний относятся определение ползучести при компрессионном сжатии, одноосном сжатии и растяжении. В процессе этих испытаний замеряют деформации во времени, затем определяют параметры прогнозных уравнений длительной прочности и длительной ползучести.

Косвенные методы дают возможность получить значения деформационных и прочностных характеристик по их корреляционным зависимостям от реакции мерзлого грунта на пенетрационные либо динамические нагрузки. К косвенным методам испытаний можно отнести методы вдавливания различного вида штампов (сферического, конусного). По глубине и скорости погружения их в мерзлый грунт рассчитывается эквивалентное сцепление, сопротивление резанию, модуль деформации.

К неразрушающим относятся различного рода геофизические методы. Они также являются косвенными и включают: электроразведку постоянным током, сейсмоакустику, магнитную и гравитационную разведку, радиолокацию, ядерно-физические методы [46]. Геофизические методы существенно ускоряют исследования и позволяют получить большой объем данных на существенной площади, что позволяет оптимизировать всю схему полевых исследований, количество выработок и полевых испытаний ММГ [29]. Использование геофизических методов позволило также установить корреляционные зависимости электрических и упругих свойств ММГ с их прочностными и деформационными характеристиками [60]. Необходимость в получении достоверной информации о строении и составе ММГ, проведение корреляции между данными геофизики, лабораторными испытаниями и полевым описанием грунтов при бурении приводит к тому, что полевые методы исследования ММГ становятся таким связующим звеном.

Полевые испытания выполняются непосредственно в массиве грунта. Они позволяют создать в процессе опытов напряженно-деформированное состояние в гораздо большем ненарушенном объеме грунта, чем в лабораторных условиях. Благодаря этому можно определить несущую способность и деформации грунтов с учетом влияния структурной неоднородности, присущей грунтовым массивам, по глубине и площади их простираения [46].

Традиционно, для исследования ММГ применяются лабораторные методы исследований и геофизические методы. Но эти методы обладают рядом недостатков, таких как сложность интерпретации полученных данных, низкая информативность в части изучения грунтов без применения прямых методов исследования. Полевые испытания грунтов характеризуются высокой стоимостью и сложностью проведения, однако они дают необходимые сведения о свойствах ММГ в месте их залегания.

К числу основных полевых методов исследования мерзлых пород можно отнести:

- Определение деформаций и сил пучения;
- Определение несущей способности замороженных свай;
- Определение сопротивления мерзлого грунта срезу;
- Определение эквивалентного сцепления вдавливанием шарового штампа;
- Определение деформационных свойств оттаивающих грунтов – метод «горячего штампа».

Определение сил деформаций и пучения следует выполнять в слое сезонного промерзания-оттаивания или в пределах площадки, на которой, согласно проектным решениям, устанавливаются сезонно-охлаждающие устройства. Согласно принятой классификации [43], разделяют касательные и нормальные силы пучения. Первые действуют по боковой поверхности фундамента (τ), вторые действуют перпендикулярно к подошве и боковым поверхностям фундаментов (σ). Нормальные силы пучения могут быть вертикальными (σ_n), горизонтальными (σ_h) и наклонными (σ_s). В практике геокриологических исследований существует два принципиальных подхода к фиксации сил пучения:

1. Непосредственным замером сил пучения с помощью динамометра или протарированной балки (схема В.Ф. Жукова [43], Рисунок 4а)
2. Уравновешивающей нагрузкой, которой догружается опытный фундамент по мере увеличения глубины промерзания грунта и возрастания сил пучения таким образом, чтобы предотвратить его перемещение. Величина этой нагрузки равна суммарному значению сил пучения на каждом этапе наблюдений (схема Н.И. Быкова [43], Рисунок 4б).

Для комплексного определения деформаций и сил пучения размер площадки должен быть не менее 20x20 м [43]. Площадка удаляется от строений и насаждений не менее чем на 10 м. Она оборудуется тремя однотипными установками и реперами. Деформации пучения удобно замерять нивелированием марок.

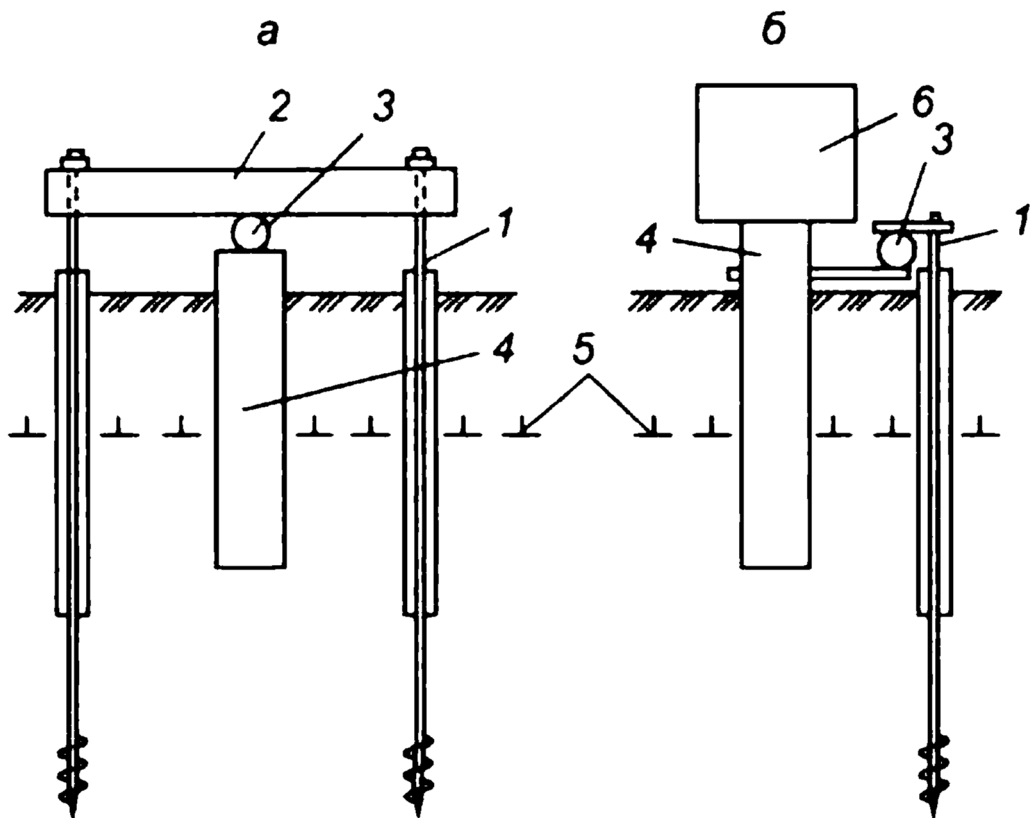


Рисунок 4 — Схемы установок определения сил морозного пучения грунтов (описание в тексте) [43]

Цифрами обозначены составные элементы конструкции установок: 1 – анкеры; 2 – балка; 3 – индикатор; 4 – опытный фундамент; 5 – граница промерзания на момент времени в процессе испытания; 6 – груз.

На территории опытной площадки также разбивается сетка пунктов замера температуры в скважинах. Фрагменты фундаментов для определения касательных и нормальных сил пучения выполняют в виде одиночных опор, чаще всего бетонных и железобетонных свай квадратного сечения. В случае определения *касательных* сил пучения шероховатость боковой поверхности моделей выполняется соответствующей шероховатости материалов фундаментов в проектируемых сооружениях. Для выполнения испытаний торец моделей изолируется от соприкосновения с грунтом, для чего под торец закладывают резиновые шары, из которых после установки модели удаляется воздух.

В моделях, предназначенных для определения *нормальных* сил пучения, боковая поверхность изолируется от соприкосновения с промерзающим грунтом. Наиболее удобным способом такой изоляции является установка обсадной трубы, пространство между стенками которой и фундаментом заполняется солидолом. Величина силы пучения определяется динамометрами с опиранием в жесткую балку.

Модель фундамента для определения *нормальных горизонтальных* сил пучения состоит из отдельных блоков, соприкасающихся лишь одной из боковых поверхностей с промерзающим грунтом. Блоки выставляются друг на друга по слою солидола, что позволяет замерять нормальные горизонтальные силы пучения независимо для каждого блока. Фиксация напряжений, обусловленных этими силами, ведется по всей высоте модели в специально оборудованной траншее. Опирание измерительной системы производится в жесткую анкерную сваю.

Определение несущей способности замороженных свай выполняются на стадии строительства для контроля соответствия несущей способности мерзлых грунтов как оснований свайных фундаментов расчетным нагрузкам. Исходя из характера работы свай (нормальная, тангенциальная или отрицательная нагрузка) испытания выполняются статической вдавливающей или выдергивающей нагрузкой, либо с приложением дополнительных сейсмических или горизонтальных нагрузок.

В процессе проведения испытания нагрузку на сваю следует передавать по центру и соосно. Расстояние между осями испытываемой сваи и анкерной системы следует принимать равным не менее трех наибольших размеров поперечного сечения испытываемой сваи (обозначение d , Рисунок 5). Предварительно на площадке следует обустроить термометрическую скважину, которая располагается на расстоянии, не превышающем 1 м от оси сваи. Замер температуры ведется с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$, через 1 м по всей глубине скважины с обязательной фиксацией температуры на уровне нижнего конца сваи и на глубине 10 м. Перед началом нагружения сваи следует дождаться ее полного смерзания с окружающим грунтом и установления стационарного теплового поля в системе свая — массив грунта.

Принципиальная схема установки для испытаний статической вдавливающей нагрузкой показана ниже (Рисунок 5). Цифрами на рисунке обозначены следующие элементы: 1 – испытываемая свая; 2 – анкерные сваи; 3 – реперная система; 4 – домкрат; 5 – упорная балка; 6 – индикаторы; 7 – поверхность грунта; 8 – граница сезонного оттаивания; 9 – теплоизоляция; 10 – термометрическая скважина; 11 – плита для упора домкрата

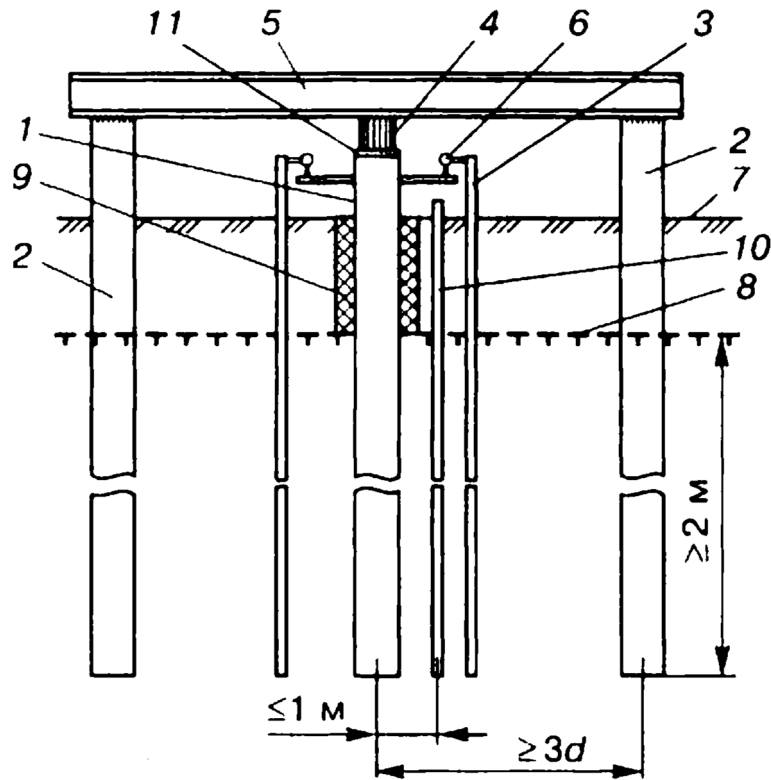


Рисунок 5 — Принципиальная схема установки для испытания сваи статической нагрузкой (описание в тексте) [43]

Нагружение сваи осуществляется ступенчато. Величину нагрузки для первых трех ступеней следует брать не более 20% от наибольшей нагрузки на сваю и 10% — для всех последующих ступеней нагрузки. На основании полученных данных определяют значение предельно-длительного нормативного сопротивления ($F_{u,n}$) основания сваи, равное наибольшей нагрузке, при которой происходит условная стабилизация перемещения сваи. Для удобства обработки данные могут быть представлены в виде графиков (Рисунок 6).

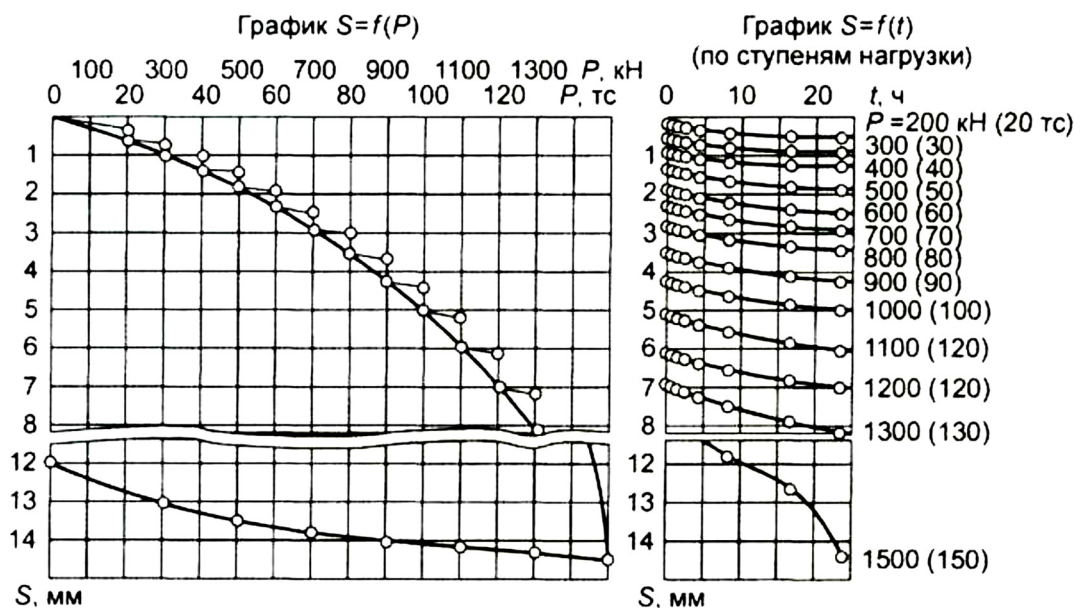


Рисунок 6 — Пример графического представления данных испытания сваи статической вдавливающей нагрузкой

Определение сопротивления мерзлого грунта срезу выполняется для измерения прочностных характеристик мерзлого грунта в соответствии с теорией предельного равновесия Кулона—Мора: сцепления и коэффициента внутреннего трения, а также модуля общей деформации. Испытание выполняется в шурфе, при выработке которого на дне оставляют не менее трех целиков ненарушенной структуры высотой и шириной не менее 30 см. Расстояние между ними составляет не менее 20 см, целики грунта вырезаются в виде куба либо параллелограмма (Рисунок 7). После зачистки сторон замеряются высота и ширина по краям и в середине каждого целика, рассчитываются средние значения размеров и объем. Далее в выполненном шурфе собирается установка для выполнения испытания. Элементы установки (Рисунок 7): 1 — целик грунта; 2, 3 — вертикальный и горизонтальный штампы; 4 — гидроцилиндры; 5 — штанга; 6 — индикаторы; 7 — реперная установка; 8 — крепление шурфа; 9 — граница оттаивания; 10 — опора для груза; 11, 12 — жесткая балка-пригруз; 13 — теплоизоляция; 14 — гирлянда термодатчиков.

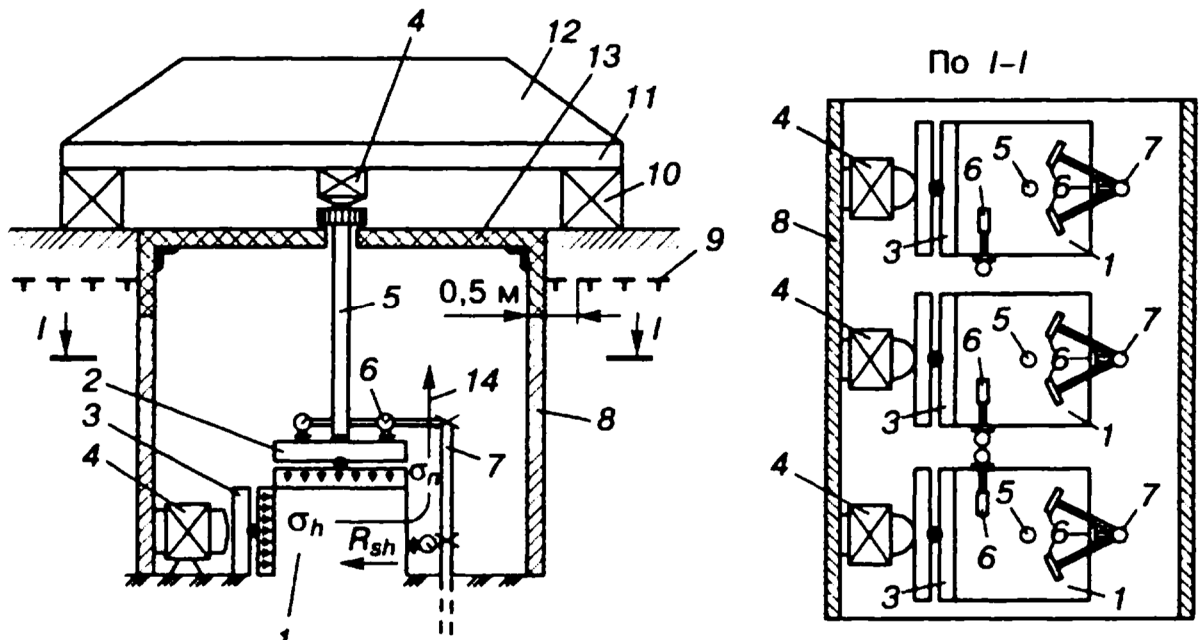


Рисунок 7 — Схема установки для определения сопротивления мерзлого грунта срезу (описание в тексте) [43]

На целики грунта монтируются горизонтальный и вертикальный штампы, гидроцилиндры. Деформации грунта измеряются индикаторами часового типа либо прогибомерами, смонтированными на реперной раме. После монтажа оборудования следует выдерживать систему не менее 24 ч для стабилизации температуры грунта. Далее на целики грунта задается нормальное давление: на первый целик — равное природному давлению, на второй — больше природного в 1,5 раза, на третий — в 2 раза больше, чем на второй, либо равное расчетному давлению. После приложения нормального давления целики выдерживаются до условной стабилизации деформаций. Далее на целики грунта подается горизонтальное сдвигающее усилие постепенно до полного сдвига целика.

По результатам испытаний строятся графики зависимости деформации среза Δl от сдвигающего напряжения R_{sh} (Рисунок 8а) и предельного сопротивления срезу R_{sh} от нормального давления σ_n (Рисунок 8б).

По данным испытаний вычисляется относительная вертикальная деформация (ε_t) как отношение абсолютной стабилизированной деформации (S_t) к первоначальной высоте целика (h):

$$\varepsilon_t = \frac{S_t}{h} \quad (5)$$

По максимальному значению горизонтальной нагрузки рассчитывается предельное сопротивление сдвигу грунта при каждом заданном σ_n :

$$R_{sh} = \frac{\sigma_h \cdot F_h}{F} \quad (6)$$

где σ_h — горизонтальное напряжение на боковой поверхности целика грунта, F_h — площадь приложения горизонтального усиления; F — площадь сдвига.

Для определения прочностных характеристик грунта на графике зависимости R_{sh} от величины нормального напряжения σ_n (Рисунок 8, б), определяются сцепление c и коэффициент внутреннего трения $\tan \varphi$ грунта из уравнения Кулона—Мора:

$$R_{sh} = \sigma_n \cdot \tan \varphi + c \quad (7)$$

Модуль общей деформации (E_0) вычисляется по формуле:

$$E_0 = \frac{\sigma_n}{\varepsilon_t}, \quad (8)$$

где σ_n — нормальное напряжение на горизонтальной поверхности целика грунта.

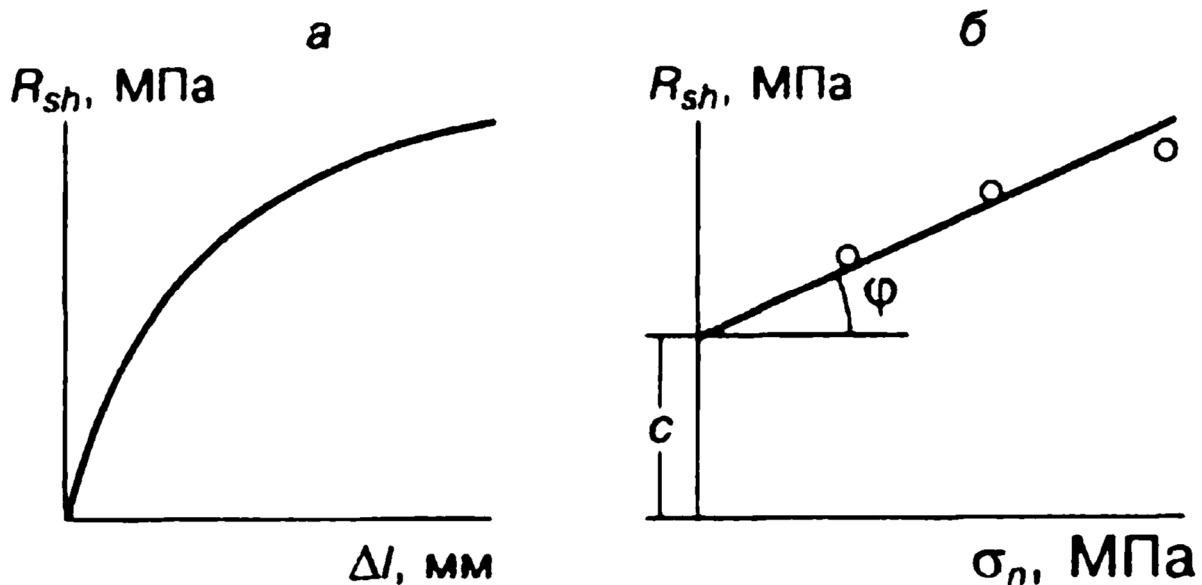


Рисунок 8 — Графики результатов определения сопротивления мерзлого грунта срезу

Определение эквивалентного сцепления вдавливанием шарового штампа проводят с целью определения сопротивления мерзлого грунта сжатию и модуля деформации. Для этого в предварительно подготовленном шурфе размещают установку (Рисунок 9). В состав установки входят следующие элементы: 1 — шаровой штамп; 2 — направляющая втулка; 3 — рычаг; 4 — станина для крепления рычага; 5 — анкеры для крепления станины; 6 — индикатор; 7 — груз; 8 — динамометр; 9 — теплоизоляция; 10 — термокоса; 11 — теплоизоляционный навес.

После монтажа оборудования система замера деформаций и напряжений приводится в нулевое положение, определяется температура грунта под штампом и на поверхности с помощью термометрической косы. На рычаг прикладывается статическая нагрузка и фиксируется время ее приложения.

Величина нагрузки зависит от вида грунта и должна удовлетворять условию:

$$0,005d_b < S_{15} < 0,05d_b ,$$

где d_b — диаметр штампа, мм; S_{15} — глубина погружения штампа в грунт через 15 мин после приложения нагрузки, мм.

Далее по данным испытаний рассчитываются эквивалентное сцепление c_{eq} , и модуль общей деформации мерзлого грунта E_{ot} .

Следует отметить, что основы данного метода взяты из металловедения и представляют собой способ определения твердости материала методом внедрения индентора (определение твердости по Бринелю) и характеристика эквивалентного сцепления, получаемая для мерзлого грунта, не является прямой аналогией величине сцепления, которая определяется из уравнения Мора-Кулона. Полученные зависимости носят эмпирический характер.

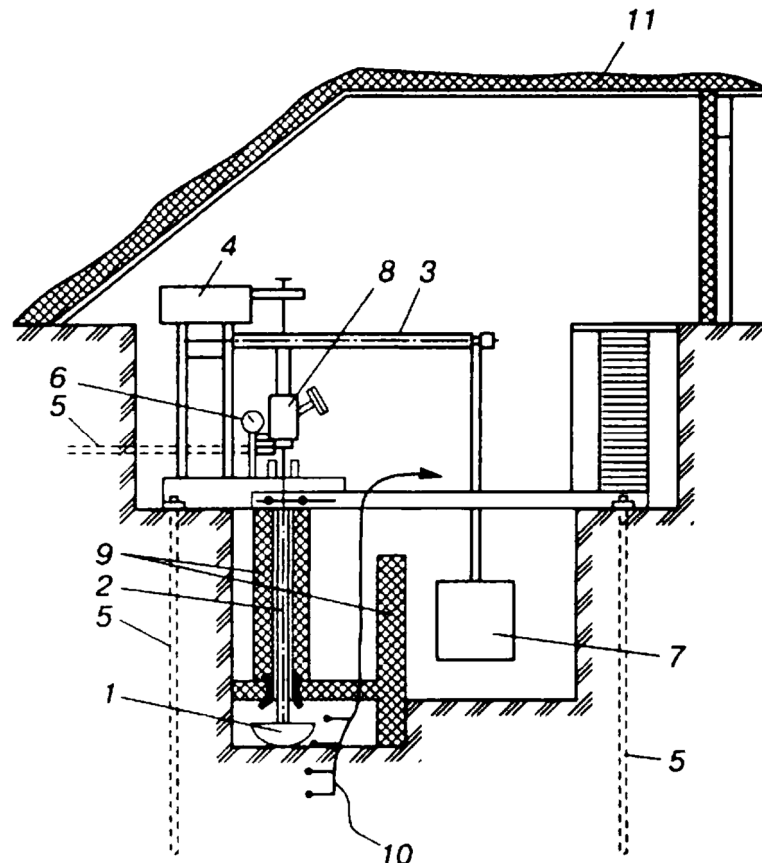


Рисунок 9 — Схема установки для испытания мерзлых грунтов шаровым штампом в полевых условиях (описание в тексте) [43]

Определение деформационных свойств оттаивающих грунтов – метод горячего штампа служит для изучения характеристик мерзлых грунтов в процессе оттаивания. В ходе испытания определяются следующие характеристики:

- коэффициент оттаивания, равный относительной осадке оттаявшего слоя грунта без дополнительного давления;

- коэффициент сжимаемости, характеризующий степень деформируемости оттаявшего грунта, уплотненного давлением, дополнительным к природному. Значение коэффициента сжимаемости определяется отношением приращения относительной осадки грунта к приращению давления.

Основные составляющие установки включают в себя круглый жесткий плоский штамп со сплошной подошвой площадью 5000 см^2 , с внутренним обогревом нагревателями или горячей водой до температуры не более 90°C , обогреваемое кольцо для расширения зоны оттаивания (ширина кольца принимается равной $0,3$ диаметра штампа, устройство для нагрузки штампа, содержащее анкеры и жесткую балку, с помощью которых создается нагрузка на штамп и обогреваемое кольцо.

Элементы установки (Рисунок 10), обозначены цифрами: 1 – горячий штамп; 2 – обогреваемое кольцо; 3 – балка; 4 – домкраты; 5 – прогибомеры либо индикаторы; 6 – термометрическая скважина; 7 – граница сезонного оттаивания; 8 – крепление шурфа; 9 – насос для откачки воды; 10 – навес; 11 – водоотводная траншея.

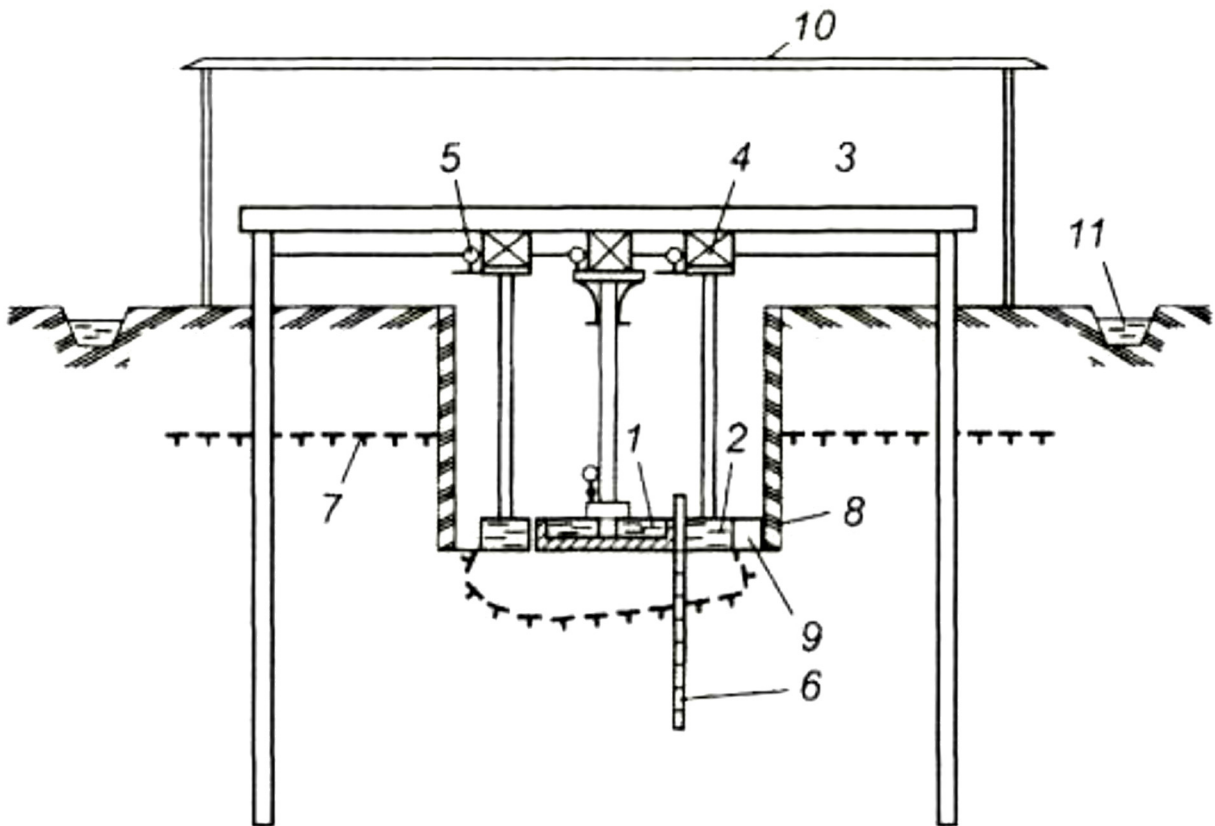


Рисунок 10 — Принципиальная схема установки для испытания мерзлых грунтов методом горячего штампом (описание в тексте) [43]

Испытания выполняют как с поверхности грунта, так и в открытых выработках. Точки проведения испытаний выбираются исходя из анализа литологического разреза предварительно пробуренной в зоне испытаний скважины.

Основные испытания включают в себя 2 этапа. На первом этапе под штампом создается зона оттаянного грунта на глубину $0,5$ диаметра штампа под нагрузкой, равной природному давлению на глубине установки штампа. Такая нагрузка (p_1) задается с учетом веса штампа и

деталей загрузочного устройства и выдерживается до условной стабилизации осадки. Второй этап – это уплотнение оттаявшего грунта ступенчато возрастающей нагрузкой, которой соответствуют ступени давления $p_2, p_3, \dots p_n$. После результаты испытания обрабатывают и вычисляются коэффициент оттаивания A_{th} и модуль общей деформации E_o .

Как уже отмечалось ранее, полевые методы исследования грунтов служат источником ценной информации.

Далее рассмотрим методы определения физико-механических характеристик мерзлых грунтов в лабораторных условиях. Для проведения лабораторных испытаний требуется наличие образцов грунта надлежащего качества, получаемых при помощи пробоотбора в процессе инженерно-геологического бурения. Бурение осуществляется при помощи буровой установки с отбором образцов ненарушенного сложения. Регламент отбора образцов, их количество, процедуры их упаковки и хранения регулируются ГОСТ 12071-2014 [63] и СП 47.13330.2012 [79], а также РСН-31-83 [74].

Следует отметить, что при отборе, транспортировке, хранении и подготовке к испытанию образцов мерзлых грунтов ненарушенного сложения должен соблюдаться комплекс требований, главными из которых являются предотвращение оттаивания и сохранение ненарушенной структуры согласно требованиям ГОСТ 12071-2014 [63]. Требования к отбору, транспортировке и хранению образцов нарушенного сложения такие же, как и для талых грунтов. Сохранение их мерзлого состояния не обязательно. Способы приготовления образцов диктуются целями и задачами исследований. Практически всегда необходимо задавать требуемую плотность и влажность, криогенную текстуру.

В лабораторных условиях для исследований мерзлых грунтов проводится комплекс испытаний, который позволяет определить различные деформационно-прочностные характеристики мерзлых грунтов при различных видах напряженного состояния и режимах нагружения. Рисунок 11 представляет основные схемы испытаний мерзлых грунтов. Приведенный комплекс лабораторных испытаний позволяет определить параметры ползучести, сжимаемости, условно-мгновенной и длительной прочности мерзлых грунтов при различных видах напряженно-деформированного состояния (НДС) образца и режима нагружения.

Наиболее важные показатели мерзлых грунтов, которые оказывают существенное влияние на проектирование сооружений в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов — это сопротивление грунта одноосному сжатию (R_c), компрессионный модуль деформации (E_f), эквивалентное сцепление (C_{eq}). При определении значений R, R_{af}, R_{sh} в лабораторных условиях следует производить испытания на сдвиг в специальных приборах - для определения R_{af} и R_{sh} (схема 16) и на одноосное сжатие или на вдавливание шарикового штампа – для определения R (схемы 1 и 11).

Цифрами обозначены следующие схемы проведения испытаний (Рисунок 11):

1 – одноосное сжатие, 2 – разрыв, 3 – простой сдвиг, 4 – сдвиг при кручении, 5 – компрессия, 6 – осесимметричное трехосное сжатие вертикальной и радиальной нагрузкой, 7 – осесимметричное трехосное сжатие с кручением, 8 – осесимметричное сжатие полого цилиндра с кручением, 9 – трехосное сжатие с независимым заданием трех главных напряжений, 10 – динамометрическое испытание в режиме релаксации, 11 – вдавливание

сферического штампа, 12 – погружение зонда, 13 – сдвиг на срезном приборе, 14 – сдвиг на клиновом приборе, 15 – раздавливание образца, 16 – сдвиг по поверхности смерзания на срезном приборе, 17 – сдвиг мерзлого грунта по поверхности модели сваи, 18 – сдвиг с заданной скоростью замороженной модели сваи.

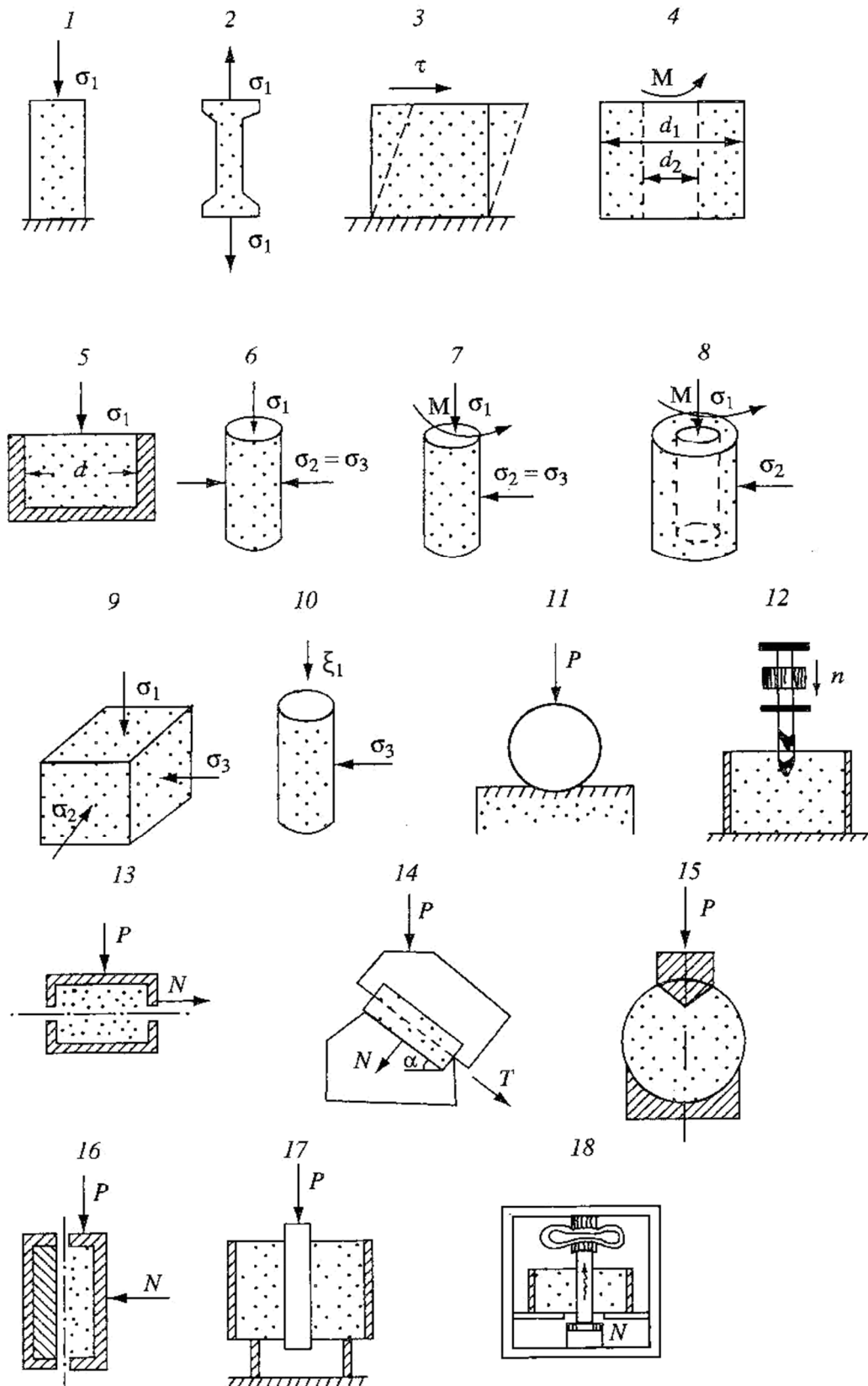


Рисунок 11 — Схемы лабораторных испытаний для определения механических свойств мерзлых грунтов (описание в тексте) [46]

Отдельно следует выделить испытание на схеме 11 — вдавливание сферического штампа при постоянной нагрузке P . Предложенный в 1947 г. Н.А. Цытовичем [58, 59] метод для определения длительного сцепления грунтов весьма эффективен. Величина сцепления по данным таких испытаний будет равна:

$$c(t) = 0,18 \frac{P}{\pi d S(t)}, \quad (9)$$

где d — диаметр шарикового штампа; $S(t)$ — изменяющаяся во времени глубина его вдавливания (осадка), P — давление от шарикового штампа, передаваемое на образец. Эта глубина меняется от начального S_0 до конечного, стабилизовавшегося значения, чему соответствуют условно-мгновенное сцепление c_0 и предельно-длительное c_∞ .

Приведенная выше формула получена, исходя из строгого решения задачи для идеально пластичного, Сен-Венанова тела и справедлива для грунтов, не обладающих внутренним трением [36].

В этой связи следует отметить, что работы А.Ю. Ишлинского [35, 36] по построению и анализу моделей деформирования неупругих систем предвосхитили этап систематического применения методов установления деформаций, наступивший во второй половине XX в. Важное значение имела выполненная в 1944 г. работа А.Ю. Ишлинского о решении осесимметричной задачи идеальной пластичности (задачи о пробе Бринелля), в которой он впервые решил сложную конкретную задачу на основании представлений о полной и неполной пластичности. В этой работе было впервые достигнуто прекрасное совпадение решения пространственной упругопластической задачи с данными опытов, причем она долго оставалась единственным примером решения подобных задач [36].

Однако позднее было показано, что значение $c(t)$, определяемое этой формулой, можно рассматривать как некоторое эквивалентное сцепление $C_{эkv}$, учитывающее влияние как сцепления, так и внутреннего трения. В частности, предельную нагрузку на фундамент (круглый или квадратный в плане) можно определять для связных грунтов по формуле:

$$p_{пр} = 5,55 \cdot c_{эkv} \frac{P}{\pi d S_\infty}, \quad (10)$$

где $C_{эkv}$ — эквивалентное сцепление грунта; P — давление собственного веса фундамента, S_∞ — максимальная осадка штампа, d — диаметр фундамента.

Согласно требованиям СП 25.13330.2012 [78] метод сферического штампа (шариковой пробы) — это основной вид испытаний для определения прочностных характеристик мерзлых грунтов в лабораторных условиях. Вдавливание сферического штампа позволяет определить расчетное давление R , также $C_{сч}$ и E_f и повысить достоверность результатов благодаря включению в напряженную зону большого объема грунта. Однако следует отметить, что метод вдавливания сферического штампа, по сути, определение твердости материала, а вычисление деформационных характеристик мерзлых грунтов носит эмпирический характер.

В этой связи особое внимание автора привлекает релаксационное испытание, изображенное на схеме 10 (Рисунок 11). Метод был разработан С.С. Вяловым и предлагался как упрощенный метод испытаний грунтов на длительную прочность с помощью

динамометрического прибора, позволяющий существенно сократить сроки испытания. Подробно он излагается в «Реологических основах механики грунтов» [15].

С.С. Вялов предложил упрощенный метод испытаний грунтов на длительную прочность с помощью динамометрического прибора [13, 14, 16], позволяющий существенно сократить сроки испытания. Схема прибора изображена на Рисунок 12, где: 1 – образец, 2 – индикатор деформаций образца, 3 – штамп; 4 – динамометр, 5 – индикатор деформаций динамометра, 6 – станина, 7 – натяжное устройство, l' – высота динамометра, l'' – высота образца, λ – мгновенная осадка при нагружении образца.

В ходе испытания образец помещается в камеру прибора, после чего на него через динамометр (4) задается нагрузка, причем после создания начального напряжения σ_0 положение динамометра закрепляется так, что размер $l = l' + l''$, (где l' – высота динамометра, l'' – высота образца) остается постоянным.

Под воздействием приложенного напряжения в образце развивается деформация ползучести, соответствующая уравнению (11), в результате чего динамометр разжимается и напряжение в нем падает.

$$\varepsilon = \Delta l'' / l'' \quad (12)$$

Другими словами, это означает, что образец грунта испытывают на ползучесть при изменяющемся напряжении и одновременно на релаксацию при изменяющейся деформации, причем изменения напряжения и деформации взаимосвязаны.

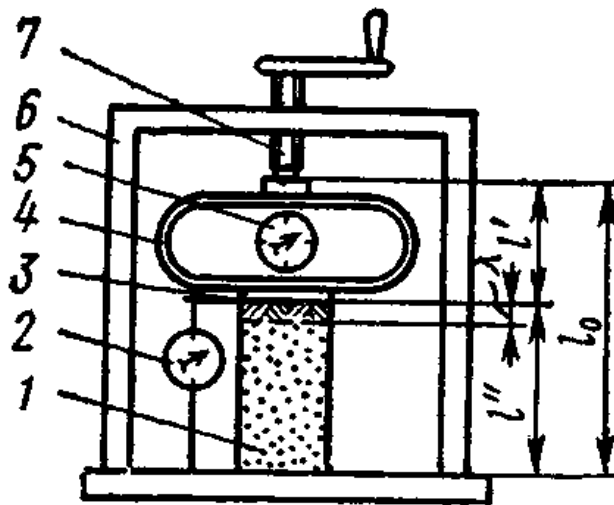


Рисунок 12 — Динамометрический прибор для испытания на длительную прочность и ползучесть (описание в тексте) [15]

В процессе испытания к образцу через динамометр прикладывают произвольное начальное напряжение σ_0 и регистрируют как снижение его во времени, так и развитие во времени деформаций образца. По полученным кривым (Рисунок 13, а) можно определить вид уравнения ползучести и значения входящих в него параметров. Принимая уравнение ползучести в форме функции напряжения равной функции деформации по времени:

$$\varphi(\varepsilon) = \sigma\phi(t) \quad (13)$$

и принимая, что:

$$\varphi(\varepsilon) = A_0 \varepsilon^m \quad (14)$$

представляется возможным определить функцию ползучести $\psi(t)$ как:

$$\varphi(\varepsilon) = A_0 \frac{[\varepsilon(t)]^m}{\sigma(t)}, \quad (15)$$

где $A_0 - \varepsilon(t)$ – деформация в образце определяемая исходя из графика (Рисунок 13а); $\sigma(t)$ – изменяющееся во времени напряжение динамометра, также определяемое по графику (Рисунок 13а).

Далее, для рассмотрения интересен тот случай, когда начальное напряжение σ_0 задано близким к условно-мгновенной прочности (определяемой предварительно), то конечное значение напряжения σ_k , соответствующее стабилизовавшейся деформации ε_k , будет находиться близко к пределу длительной прочности σ_∞ , поскольку стабилизацию деформации следует рассматривать как достижение равновесия между действующей нагрузкой и внутренними силами сопротивления грунта, выраженного в виде выражения:

$$\sigma_\infty = \xi \sigma_k; \text{ где } \xi = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_k} \right)^m \quad (16)$$

Методика такого варианта испытания заключается в ступенчатом повышении начального напряжения σ_0 с выдерживанием каждой ступени до стабилизовавшегося конечного значения σ_k (Рисунок 13б) с одновременной регистрацией деформации образца $\varepsilon(t)$. На основе этих данных строят график зависимости между σ_k и ε_k (Рисунок 13б), из которого определяют вид функции $\varphi(\varepsilon)$, а также величину σ_∞ . В результате того, что процесс релаксации напряжения происходит значительно быстрее процесса ползучести (время релаксации $T_r \ll$ времени последствия T_p), на испытания на динамометрическом приборе требуется значительно меньше времени, чем на обычные испытания, например методом сферического штампа.

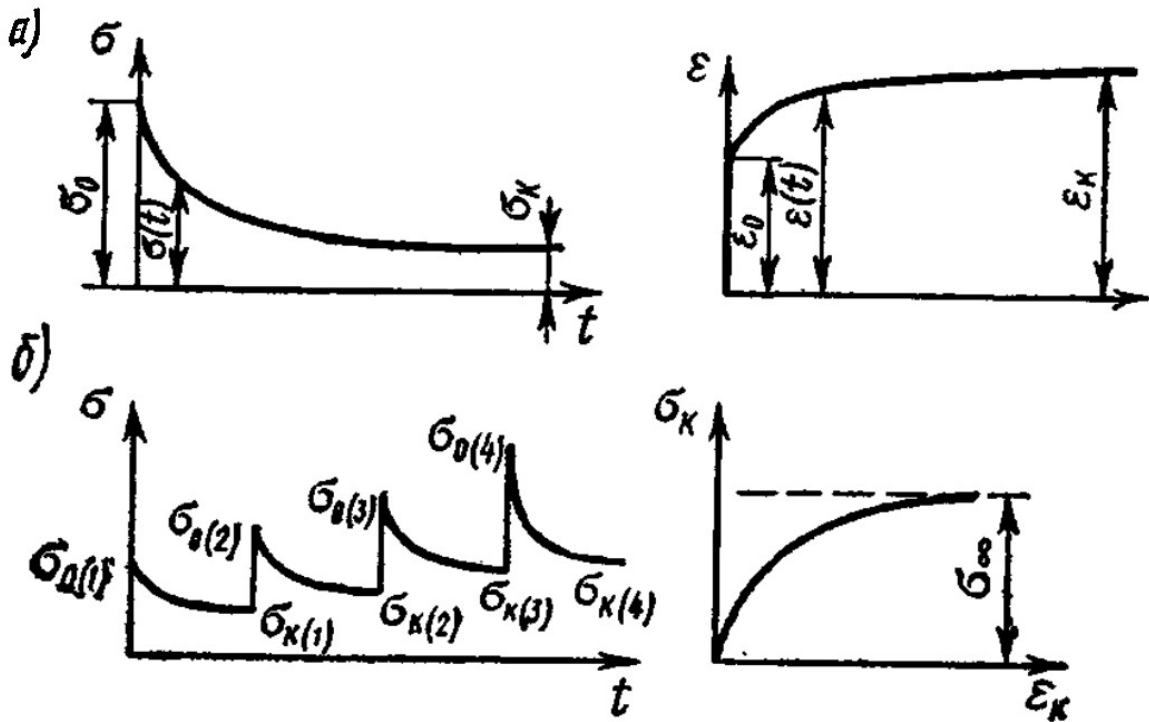


Рисунок 13 — Графики результатов испытаний мерзлого грунта в динамометрическом приборе: а – при разовом нагружении, б – при ступенчатом нагружении [15]

Резюмируя проведенные описания различных методов испытаний грунтов, можно констатировать следующее. Полевые испытания мерзлого грунта дают более высокую точность и достоверность результатов испытаний, возможность получения расчетных показателей E_f , C_{eq} и, главное, сложность отбора, транспортировки и хранения монолитов мерзлых грунтов без нарушений сложения позволяет говорить о более предпочтительном проведении полевых испытаний грунтов, по сравнению с лабораторными испытаниями. В свою очередь некоторые лабораторные испытания мерзлых грунтов позволяют определить важнейшие параметры, что делает их незаменимыми для получения характеристик мерзлых грунтов. Однако, стоит отметить, что наиболее полно и достоверно значения характеристик мерзлых грунтов могут быть определены при сочетании полевых и лабораторных испытаний. Также среди требуемых параметров мерзлых грунтов для использования их в качестве основания сооружения фигурирует вычисление несущей способности свай. Наиболее эффективными полевыми испытаниями для определения этой характеристики в немерзлых грунтах наряду с полевым испытанием свай статическими и динамическими нагрузками является статическое зондирование. Следовательно, целесообразно рассмотреть применение метода статического зондирования для получения таких характеристик и для мерзлых грунтов. Однако, испытание ММГ статическим зондированием не позволяет напрямую определить величину ползучести и деформацию массива грунта. В свою очередь статическое зондирование позволяет проводить прямой замер напряжений, возникающих в грунте под наконечником зонда и касательных напряжений по муфте бокового трения. В процессе движения зонда измеряемые параметры можно интерпретировать как условно-мгновенную прочность грунта одноосному сжатию и сдвигу соответственно. В случае остановки зонда и фиксации приложенной нагрузки датчики будут фиксировать релаксацию напряжений, остаточное значение которого может быть интерпретировано, как предел длительной прочности мерзлого грунта.

Выводы

1. Механика мерзлых грунтов отличается от талых в силу наличия в их составе льда, особенностей строения и структурных связей. В строительной практике проектировщиками было введено деление грунтов на твердомерзлые и пластичномерзлые, исходя из их коэффициента сжимаемости. Однако, мерзлые грунты проявляют упруго-пластично-вязкое поведение при воздействии нагрузки, а тип поведения (хрупкое или пластичное) зависит от скорости приложения нагрузки. Например, лед может проявлять как хрупкое разрушение при кратковременном воздействии (удар молотком), так и пластическое течение при долговременном воздействии (течение ледников). В связи с этим, существующее в практике ограничение на применение статического зондирования только на пластично-мерзлых грунтах является необоснованным. Критерий твердомерзлый/пластичномерзлый не может служить ограничением для исследования ММГ методом статического зондирования.
2. Метод компрессионного сжатия, применяемый для определения длительной прочности мерзлого грунта, основан на обработке кривых ползучести. При выполнении испытаний выделяют условно-мгновенную прочность, длительную прочность и предел длительной

прочности. Это позволяет точно определить какая величина нагрузки вызывает затухающую и незатухающую ползучесть, последняя из которых в конечном счете приводит к разрушению грунта, но определение прочности этим методом в лаборатории проводится только на некотором количестве идентичных (модельных) образцов грунта и занимает очень продолжительное время. Это ограничение не позволяет применять метод компрессионного сжатия для определения длительной прочности на практике на образцах естественного сложения.

3. Обзор существующих лабораторных методов определения механических характеристик мерзлых грунтов выявил следующие ограничения:
 - а. Для ускорения проведения испытания вводится понятие «условной стабилизации», что приводит к сокращению сроков проведения самих испытаний, но не позволяет получить значения истинной длительной прочности. Для решения этой задачи всегда используются некоторые эмпирические/поправочные коэффициенты.
 - б. Извлечение и доставка образцов мерзлого грунта из районов распространения многолетнемерзлых грунтов до лаборатории в естественном (ненарушенном) состоянии при естественной температуре невозможны. Поэтому большинство лабораторных испытаний проводится на образцах с восстановленной структурой и при температуре, отличной от естественной.
 - в. Воссоздание естественной температуры в образце мерзлого грунта в диапазоне $0...-1^{\circ}\text{C}$ является затруднительным на практике, но такие грунты широко распространены и являются объектом интенсивной хозяйственной деятельности человека.
4. Обзор существующих полевых методов определения характеристик мерзлых грунтов выявил, что они также используют понятие «условной стабилизации», но дают существенно более точные результаты в силу того, проводятся в массиве грунта. Однако, основным ограничением полевых методов является их малая глубинность (до 8-10 м), сложность подготовки грунтов в массиве грунта к испытаниям и продолжительное время стабилизации температуры после подготовки массива грунта к испытаниям.
5. Существует необходимость в разработке новых эффективных, доступных, легко применимых в условиях низких температур и точных методах для исследования многолетнемерзлых грунтов (ММГ).

ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГРУНТОВ

2.1 Общее описание метода статического зондирования

Полевые исследования грунтов с помощью конического зонда впервые были выполнены в 1932 г. в Голландии инженером П. Барентсеном [82]. В процессе испытаний измерялось сопротивление вдавливанию конического зонда в грунт на глубину до 4 м в насыпном грунте. Показания передавались на поверхность при помощи системы металлических штанг и вручную фиксировались. В дальнейшем было добавлено измерение трения грунта о боковую поверхность внедряемого прибора. Позднее, в 1948–1949 годах Лабораторией механики грунтов Дельфтского университета была изготовлена электрическая версия пенетromетра с непрерывной записью величины лобового сопротивления по глубине [99]. Дальнейшее развитие зондов для статического зондирования базируется на электротензометрических приборах, снабженных различными дополнительными датчиками. С течением времени данная методика полевых испытаний грунтов заняла особое место при исследовании грунтов для проектирования свайных фундаментов в результате того, что при таком испытании достигается высокое сходство конструкции и условий погружения в грунт зонда и сваи. В 1977 г. опубликован международный рекомендательный стандарт на различные методы зондирования, разработанный и принятый Международным обществом по механике грунтов и фундаментостроению (ISSMFE), позднее, в 1989 г. вышла обновленная версия данных рекомендаций проведения [112], которая действительна по настоящий момент. В число разработчиков этого документа входили также и советские исследователи [39, 48, 53].

В Советском союзе испытания грунтов методом статического зондирования также проводились и тема имела отражение в рекомендациях СН 448-72 «Указания по зондированию грунтов для строительства» [76] которые взяли за основу наиболее распространенный в 1960-е годы зонд с площадью основания 10 см^2 [41, 48, 53]. Далее в 1974 г. был издан первый стандарт на статическое зондирование ГОСТ 20069-74 [65], с последующим переизданием в 1981 г. [66]. Испытания грунтов методом статического зондирования получили широкое применение в практике инженерно-геологических изысканий и при исследованиях грунтов для проектирования свайных фундаментов на территории СССР. В современной практике инженерно-геологических изысканий статическое зондирование используется в качестве обязательного метода полевых исследований, дополняющего бурение и лабораторные испытания грунтов.

Общепризнано, что достоверная оценка инженерно-геологических условий может быть выполнена только при комбинировании различных методов полевых и лабораторных испытаний грунтов. Неоспоримым преимуществом полевых методов испытаний грунтов является их применение непосредственно в грунтовом массиве. В настоящее время в ряду методов полевых исследований статическое зондирование занимает особое место, так как позволяет проводить прямую оценку ряда характеристик грунтов, таких как измерение прочностных характеристик грунтов, несущей способности свай, измерения порового давления и температуры грунтов. Также при помощи статического зондирования возможно проводить

оценку изменчивости грунтового массива, картирование кровли различных горизонтов, в т.ч. проводить выбор опорного горизонта для проектирования свайных фундаментов [27]. Быстрота и точность получаемых сведений позволяет выполнять статическое зондирование в большом объеме и наряду с лабораторными исследованиями и бурением скважин служить основным источником геологической информации.

Другие полевые методы обладают большей дискретизацией в силу технологических особенностей. Такие методы как штамповые или прессиометрические испытания [67, 108, 109], плоский [24, 110] и расклинивающий [73] дилатометр являются источником ценной информации, однако их применение носит не такой массовый характер, а значит должно проводиться адресно, для получения точных сведений в местах, представляющих наибольший практический интерес.

В настоящее время разработано большое количество различных видов зондов и установок для их внедрения в грунт. В России за последнее время были опробованы и применяются многие виды зондов для получения информации о состоянии грунтов в массиве [7, 24, 28, 33, 61] Широкий спектр оборудования для проведения испытаний позволяет применять статическое зондирование практически для всех типов дисперсных грунтов (Рисунок 14).

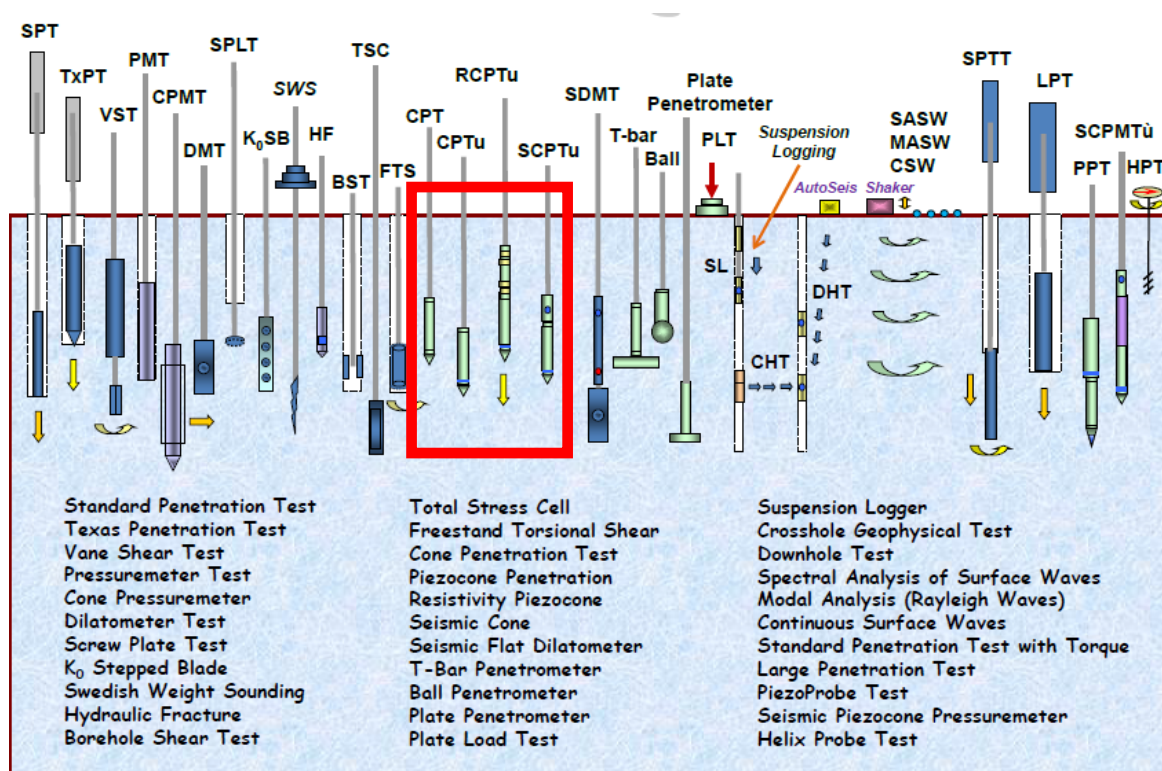


Рисунок 14 — Виды полевых зондов и пробоотборников (описание в тексте) [92]

В практике инженерно-геологических и геотехнических исследований статическое зондирование применяется для наземных, морских, а также прибрежных работ [40, 93]. Существует возможность проведения зондирования морского дна на глубинах до 3 км, включая донные осадки и коренные дисперсные отложения. В прибрежной зоне и на суше статическое зондирование охватывает все виды дисперсных грунтов, за исключением чрезвычайно уплотненных или содержащих большое количество твердых включений. Таким образом,

статическое зондирование служит источником информации о свойствах и строении грунтов для проектирования и строительства сооружений любого назначения.

Суть статического зондирования грунтов заключается во вдавливании в грунт металлического зонда-конуса или, другими словами, индентора. При этом непрерывно ведется запись следующих параметров:

- лобовое сопротивление, q_c ;
- локальное трение по муфте, f_s ;
- поровое давление, u_2 .

Также зонд может быть снабжен датчиками измерения удельной электропроводности грунта, геофонами, датчиком измерения температуры, различными установками радиоактивного каротажа, датчиком измерения концентрации различных летучих веществ, видеокамерой, прессиомером.

С развитием теории статического зондирования и по мере накопления фактического материала было установлено, что измерение лобового сопротивления, бокового трения и порового давления являются обязательным условием корректности получаемых данных, дополнительные датчики служат для решения специальных задач. В рамках исследования, представленного в данной работе, например, датчик температуры в зонде служит для измерения температуры мерзлых грунтов.

2.2 Виды установок для статического зондирования

Внедрение зонда в грунт осуществляется при помощи специальных механизмов, включающих кроме самого зонда устройство для его вдавливания и извлечения, опорно-анкерное и измерительные устройства. Все это оборудование монтируется на единой платформе. Такие установки могут быть: самоходными, передвижными прицепными, переносными сборно-разборными или в виде приспособлений к буровым установкам. Некоторые типы установок успешно используются уже несколько десятилетий, подвергаясь лишь незначительной модернизации, в то же время другие появились совсем недавно и отражают современные тенденции. В СССР было разработано около 10 типов установок зондирования и широко использовались два типа – С-832 и СП-59 [41, 48, 94]. Зондировочные установки подразделяются в зависимости от усилия вдавливания зонда на легкие – до 50 кН, средние – 50–100 кН и тяжелые – более 100 кН). В определенной мере это отражается и на габаритах установок: легкие установки имеют, как правило, минимальные габариты, тяжелые – максимальные. Практика подтвердила целесообразность разделения установок по этим признакам. Каждый тип получил свою довольно четкую область применения. Например, в особо стесненных условиях удается использовать только легкие установки, для проектирования свайных фундаментов – только тяжелые или средние и т.д. Нижеперечисленные типы установок рассматриваются отдельно.

Легкие установки в СССР и России на практике применяются достаточно редко. Иногда выделяют в отдельную группу мелкие ручные устройства для зондирования (зонды-щупы, называемые также ручными пенетрометрами) с усилием вдавливания 0,05 – 1 кН. Такие

устройства формально относятся к легким установкам, но они требуют совершенно иного использования и предполагают свою область применения: зондирование на небольшую глубину на непроходимых для транспорта местах, для послойного контроля плотности насыпей и т.д. К упомянутым устройствам относятся, например, зонды-щупы Hanson–5 массой 8 кг Hanson–10 массой 30 кг. Их производительность невысока, но глубина погружения зондов-щупов типа Hanson–5 или Hanson–10 ограничена массой самого испытателя. В грунтах средней прочности такая глубина обычно не превышает 2...3 м, однако в слабых грунтах типа илов, сапропелей она может достигать 7...10 м. Для увеличения максимальной глубины погружения в более прочных грунтах некоторые типы зондов-щупов снабжаются дополнительными грузами, которые укладываются и закрепляются на щупе в процессе проведения испытания.

Ручные зонды-щупы обычно используются для оценки консистенции глинистых грунтов, плотности рыхлых песков, насыпных грунтов. Для количественной оценки механических свойств грунтов они малопригодны, однако при использовании в комплексе с более точными испытаниями они могут оказаться полезными и при решении таких задач.

Средние установки, как правило, снабжаются стандартными зондами I или II типа, причем чаще всего используются тензометрические зонды, реже механические. Разработанные в СССР установки конструкции Фундаментпроект С-979 и СП-59 имеют механические зонды I типа, заменяемые иногда на тензометрические зонды II типа.

Штанга, на которой закрепляется зонд, состоит из одинаковых звеньев длиной 0,5 – 2 м (чаще всего 1 м). Нарастивание штанги производится по мере погружения зонда. Процесс погружения зонда также аналогичен описанному выше процессу у легких установок на базе автомобильных прицепов, т.е. зонд вдавливается с помощью зажимного устройства и гидравлической системы.

Средние установки имеют анкерные винтовые сваи, но, как показывает практика, при тяжелых базовых машинах в ряде случаев можно обходиться без использования анкерных свай - вес машины зачастую достаточен для восприятия реактивных усилий. Естественно, что это создает большие технологические преимущества - существенно упрощает и ускоряет работы по зондированию.

Кроме специализированных установок для статического зондирования на практике находят применение различные приставки (навесное оборудование) к буровым станкам, позволяющие выполнять статическое зондирование. Принципы работы такого навесного оборудования такие же, как и у специализированных установок.

Тяжелые установки, т.е. установки с усилием вдавливания более 100 кН, наиболее эффективны при больших объемах работ и необходимости изучения грунтовых условий на значительную глубину.

В СССР одной из первых установок статического зондирования тяжелого типа является установка С-832 [41, 47, 48] (Рисунок 15, Рисунок 16), серийный выпуск которой был начат в 1963 г.. Как уже отмечалось, в установке использовался тензометрический зонд II типа, запись показаний осуществлялась самописцами на диаграммных лентах.



Рисунок 15 — Установка статического зондирования С-832М [47]

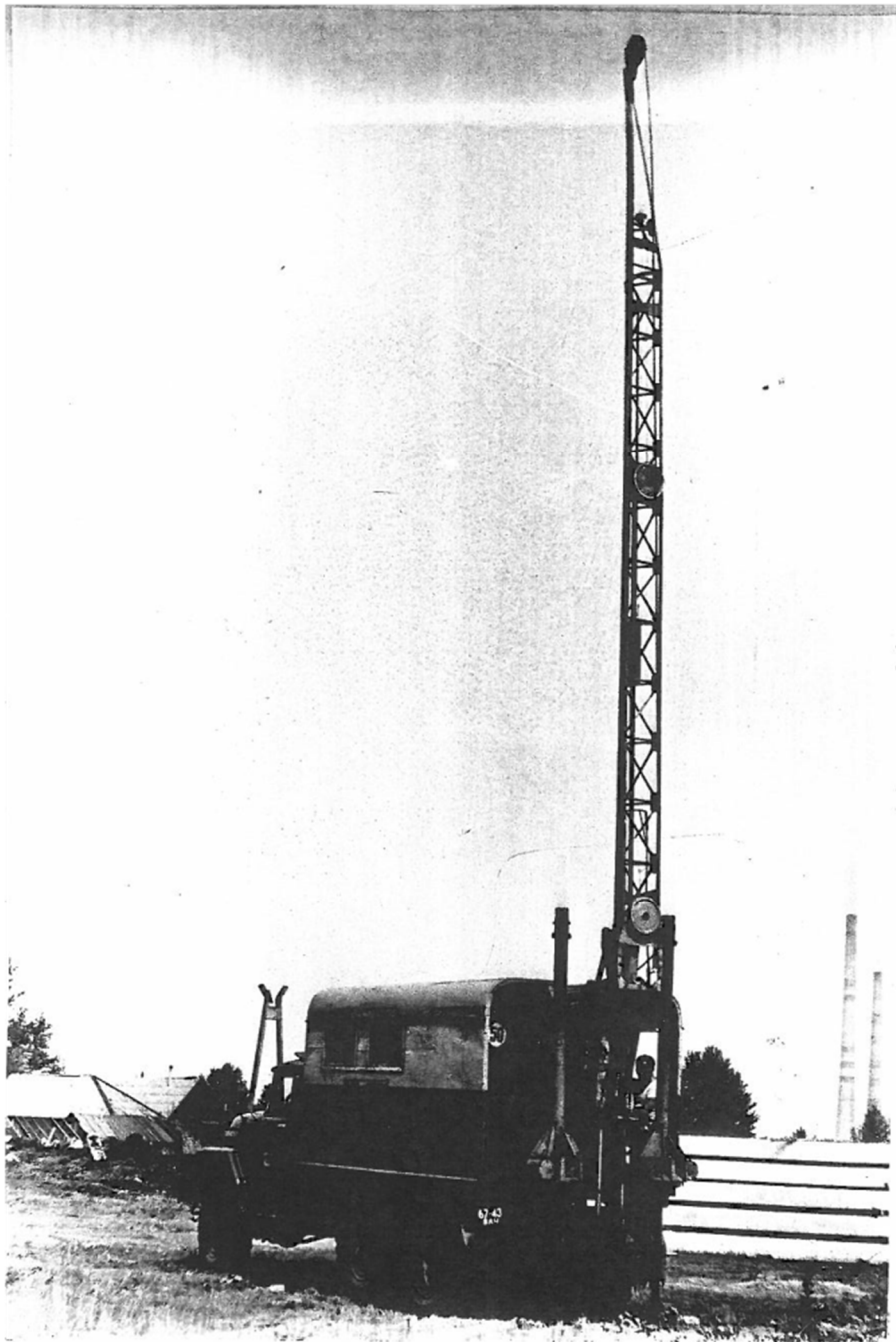


Рисунок 16 — Фотография установки статического зондирования С-832М [47]

Современная технология статического зондирования предусматривает использование мощных гидравлических систем для задавливания зонда с датчиками в грунт. Чаще всего для этой цели используются тяжелые самоходные платформы, такие как автомобили Урал, КамАЗ, GINAF, MAN, а также гусеничные шасси различной грузоподъемности. В практике компании Fugro наибольшую популярность получили автомобили вездеходы с колесной формулой 6×6 (Урал, Рисунок 17) или 4×4 с подвесной гусеничной платформой (MAN, Рисунок 18). Платформа также служит для выравнивания установки в горизонтальной плоскости, в случае колесного вездехода эту функцию выполняют телескопические опоры гидросистемы.



Рисунок 17 — Тяжелая установка статического зондирования Фугро на базе а\м Урал (фото автора)

Тяжелая установка статического зондирования на самоходной гусеничной платформе является наиболее проходимым в сложных условиях изделием (Рисунок 19). Обладая собственным двигателем, такая платформа способна передвигаться вне дорог.

Такие системы внедрения зонда в грунт развивают усилие вдавливания до 200 кН и позволяют наиболее полно реализовать возможности измерительного оборудования и достичь существенных глубин. В СССР и России рекорд глубины статического зондирования без предварительного разбуривания составляет 91 м [49]. Также тяжелая установка служит надежным упором при проведении различных специализированных испытаний грунтов при помощи конуса статического зондирования. Например, статического зондирования со стабилизацией, когда требуется неподвижная фиксация зонда в грунте под нагрузкой.



Рисунок 18 — Тяжелая установка статического зондирования Фугро с подвесной гусеничной платформой на базе а\м MAN (фото автора)

Внутри тяжелая установка статического зондирования оснащается оборудованием для контролируемого задавливания зонда в грунт и комплектом измерительной и записывающей аппаратуры. Самоходная тяжелая установка статического зондирования позволяет в зависимости от грунтовых условий выполнять до 200 м статического зондирования за день, что существенно больше по сравнению с установками более легких классов, где требуется дополнительная анкеровка и пригрузление установки для выполнения испытаний.

Статическое зондирование может применяться как на суше, так и на море. Как с автотранспорта, так и с железнодорожных платформ [86] в связи с этим разработаны специализированные установки.

Особым направлением в развитии статического зондирования является подводное зондирование. Проведение инженерно-геологических изысканий в акваториях является очень трудоемкой и дорогостоящей работой. Традиционные способы изучения грунтов путем бурения и отбора монолитов в этом случае резко усложняются. В таких условиях использование статического зондирования оказывается наилучшим решением. Оборудование для такого зондирования значительно сложнее, чем для зондирования «наземного». Без специальных приспособлений зондирование непосредственно с плавучих средств невозможно в силу

недостаточной устойчивости штанги зонда, которая должна работать на поперечный изгиб при большой свободной длине.

По этой причине применяется два подхода:

- зонд погружается через направляющую трубу или другое устройство, исключая потерю устойчивости штанги (вдавливающее устройство располагается на плавучем средстве);
- вдавливающее устройство опускается на дно водоема, и зондирование ведется со дна.



Рисунок 19 — Установка статического зондирования Фугро на гусеничном ходу (фото автора)

Как показано выше, классическая схема установки оборудования для статического зондирования включает в себя либо комбинацию статики и буровой установки, либо отдельный грузовик массой около 20 т. Однако, классическое гидравлическое оборудование невозможно или крайне сложно установить внутри контура эксплуатируемого сооружения (за редким исключением промышленных цехов и тому подобных пространств.). Для выполнения испытаний грунтов в таких стесненных условиях было решено разработать практику применения мобильной установки для статического зондирования.

Мобильная установка статического зондирования (монопод) развивает максимальное усилие вдавливания 150 кН (Рисунок 20), что позволяет классифицировать ее как тяжелую. Питание обеспечивается с помощью автономной бензиновой маслостанции.

Для работы с мобильной установкой статического зондирования достаточная высота проветриваемого подполья составляет от 1,90 до 2,20 м. Использование мобильной установки позволяет без дополнительных мероприятий выполнить статическое зондирование. Реакция для вдавливания конуса создается опиранием задавливающего устройства в несущие конструкции сооружения. В процессе сбора полевых данных, положенных в основу работы, автором применялись тяжелые самоходные и несамоходные установки зондирования, а также малогабаритные установки для работы в стесненном пространстве.



Рисунок 20 — Малогабаритная установка статического зондирования (монопод) во время испытания (фото автора)

2.3 Виды зондов статического зондирования

В настоящее время в мировой практике применяется несколько десятков типов зондов, которые по принципу измерений могут быть разделены на две группы:

- механические, в которых используется система внутренних штанг для передачи усилия на конический наконечник (МСРТ) [64, 111];
- электрические (тензометрические), в которых измерения производятся с помощью электрических (тензодатчиков и пр.) датчиков (СРТ, СРТУ, РСРТУ, ТСРТУ, RTCРТУ) [64, 69, 104, 106, 107, 112].

В настоящее время большинство применяемых в мире зондов снабжено тензометрическими датчиками силы и комплектом дополнительных измерительных устройств (Рисунок 21).

Это объясняется следующими преимуществами тензометрических зондов:

- исключением характерных для механических зондов погрешностей измерений, обусловленных трением между внутренней и наружной штангами;
- возможностью непрерывных измерений без значительных взаимных перемещений частей зонда относительно друг друга, исключением проникновения грунта внутрь зонда;
- удобством и повышенной надежностью измерений, возможностью автоматической записи получаемых результатов;
- высокой чувствительностью измерений, позволяющей изучать очень слабые грунты.

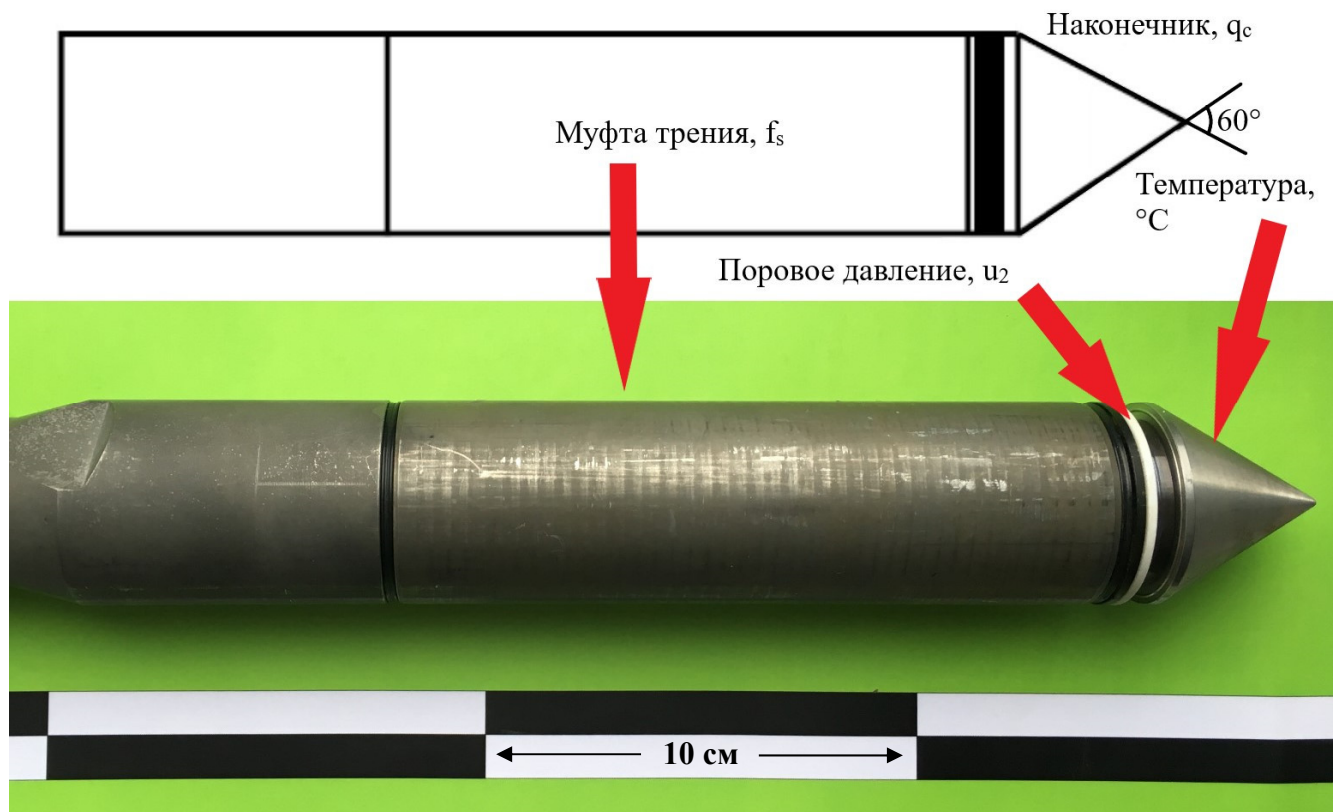


Рисунок 21 — Схема компоновки датчиков зонда (составлено автором)

Согласно международным стандартам и рекомендациям [107, 112], у тензометрических зондов угол при вершине должен быть равен 60° , площадь основания конуса должна быть равной 1000 мм^2 , что соответствует диаметру $35,7 \text{ мм}$, боковая поверхность муфты трения 15000 мм^2 . Следует отметить, что на практике применяются другие площади основания и муфты трения, но они должны геометрически соответствовать описанной выше конструкции и ключевым понятием, которое вводится в работу является коэффициент чистой площади, значение которого должно лежать в диапазоне $0,5\text{--}0,9$ для зондов диаметром от 25 до 50 мм .

Широко распространено мнение, что грунт под зондом должен сильно уплотняться, вследствие чего применение зондов нестандартного размера требует применения поправочных коэффициентов. Однако И.Б. Рыжковым в 1992 г. экспериментально установлено [47], что этот

эффект сильно преувеличен. Показано, что при движении зонда грунт испытывает не только уплотнение, но и деформации сдвига, происходящего по поверхностям скольжения, имеющим весьма малые углы относительно вертикали. Это происходит при неизменной плотности деформируемой среды, т.е. грунта. Аналогичный характер деформаций грунта обнаруживался и под натурными сваями в экспериментах В.Н. Голубкова [18].

В Межгосударственном стандарте ГОСТ 19912-2001 [64] площадь основания конуса тоже принята равной 10 см^2 (35,7 мм), боковая поверхность муфты трения от 10000 до 35000 мм^2 (что соответствует длине от 90 до 310 мм, диаметру 35,7 мм). Таким образом, требования обоих стандартов практически совпадают, хотя Международный стандарт ISO 22476-1 [107] отдает предпочтение площади муфты трения 15000 мм^2 . Такой выбор основан на сравнительных исследованиях применения различных вариантов длины муфты трения [89]. Установлено, что увеличение длины муфты трения вызывает усреднение показаний сопротивления трения грунта по боковой поверхности. Укороченная муфта трения ведет, наоборот, к появлению большего числа пиковых значений и увеличения общего «шума» в записи. Площадь муфты трения 15000 мм^2 выбрана в качестве оптимальной по соотношению «данные-шум» и обеспечивает требуемую детальность.

В своей работе автор сталкивался с применением большого количества различных комбинаций измерительного оборудования для статического зондирования. Для проведения полевых испытаний в массиве грунтов применяется два основных типоразмера зондов – это зонды с площадью поперечного сечения 10 см^2 и 15 см^2 . Условия применения являются определяющим фактором в выборе типоразмера зонда. На суше, на реках, в зоне неглубокой акватории – 90% 15 см^2 конуса, 10% 10 см^2 конуса; зона глубокой акватории – 50% 15 см^2 конуса, 50% 10 см^2 конуса – такое распределение связано с видами и геометрическими размерами применяемого вдавливающего оборудования, и работой в скважинах.

Лидирующие на мировом рынке производители измерительного оборудования также используют эти два типоразмера в следующих пропорциях:

1. ПИКА, Геотест — 100% – 10 см^2 конуса;
2. A.P. Van den Berg — 80% – 10 см^2 , 20% – 15 см^2 и другие;
3. Envi — 100% – 10 см^2 ;
4. Fugro — 90% – 15 см^2 конуса, 10% – 10 см^2 конуса;
5. Geomil — 50% – 15 см^2 , 50% – 10 см^2 ;
6. Geotech — 90% – 10 см^2 конуса, 10% – 15 см^2 конуса;
7. Gouda — 55% – 15 см^2 , 45% – 10 см^2 ;
8. Gregg — 100% – 15 см^2 конуса;
9. Vertek — 60% – 10 см^2 , 40% – 15 см^2 .

Практика проведения полевых испытаний в массиве грунтов показывает, что применение конусов 15 см^2 дает лучшие результаты по глубинности зондирования, устойчивости движения зонда в массиве и качеству получаемых данных за счет общей прочности конструкции. Подобные зонды также регламентированы международным стандартом и допущены к применению без дополнительных поправочных коэффициентов.

Методы зондирования используются с целью идентификации типа грунта, стратиграфии и определения механических свойств грунтов. Дополнительное оборудование, применяемое в зондах для статического зондирования, позволяет более детально проводить расчленение грунтов на элементы, основываясь на большем числе источников данных. Параллельно с этим дополнительные датчики позволяют определять некоторые свойства грунтов независимо от основных измеряемых показателей q_c и f_s . Ниже следует перечислить наиболее часто применяемые дополнительные датчики.

Впервые материалы по измерению порового давления в процессе внедрения зонда были представлены на первой Европейской конференции по испытаниям грунтов зондированием (ESOPT-1) в Стокгольме в 1974 г. Традиционный электрический пьезометр, разработанный Норвежским геотехническим институтом (NGI), использовался для измерения поровых давлений при зондировании, в точках прилегающих к профилям СРТ. На этой же конференции была признана важность подобных измерений в процессе движения зонда, а также были представлены материалы по измерению порового давления во время паузы во вдавливании, на неподвижном пьезометре. Результатом этих исследований стала возможность показать потенциал для обнаружения тонких проницаемых слоев, встроенных в толщу глинистого грунта. В ходе исследований по измерению порового давления при зондировании в период с 1974 по 1989 гг. было разработано большое количество различных зондов с различным количеством датчиков порового давления (от 1 до 3 в одном зонде). Постепенно практика изменилась и рекомендуемое положение датчика сразу за конусом в точке u_2 (Рисунок 21) было закреплено положением Международного общества по механике грунтов и фундаментостроению (ISSMFE) в 1989 г. [112].

Таким образом, все современные тензометрические зонды оснащены, по меньшей мере, одним датчиком давления для измерения давления воды в поровом пространстве, создаваемом во время зондирования (Рисунок 22). Данные с этого датчика позволяют рассчитать избыточное поровое давление $\Delta u = u_m - u_o$, где Δu – разница между создаваемым поровым давлением и гидростатическим давлением (u_o). Включение датчика порового давления в конструкцию зонда стало значительным улучшением в технологии изготовления оборудования, потому что полученные измерения избыточного порового давления обеспечивают важную информацию о типе грунта. Зондирование тонкодисперсных грунтов, которые имеют характерную низкую гидравлическую проводимость, создают большие поровые давления, превышающие гидростатические значения, потому что вытесненная поровая влага не может свободно перемещаться по всему объему грунта; следовательно, зондирование происходит в недренированных условиях, что характерно сказывается на показаниях, получаемых от силовых датчиков зонда [92].

Интерпретация данных, полученных из измерений порового давления, также позволяет проводить оценку параметров геологической среды, включая коэффициент уплотнения и проницаемость грунтового массива. Это дает информацию о потоках поровой жидкости в массиве грунтов и важно в таких вопросах, как например наблюдения за консолидацией глиняных слоев-изоляторов при захоронении отходов и информация о переносе загрязняющих веществ. Крупнозернистые грунты, которые имеют высокую гидравлическую проводимость, не

создают больших избыточных поровых давлений, потому что вытесненная вода может легко рассеиваться в окружающем зонд массиве грунта.

Для наблюдений за гидростатическим поровым давлением используется технология замера при неподвижном зонде, называемая диссипацией. Суть такого замера заключается в следующем, во время приостановки внедрения зонда избыточное поровое давление, создаваемое вокруг конуса при его внедрении, начинает рассеиваться. Скорость рассеивания давления зависит от коэффициента консолидации, который, в свою очередь, зависит от сжимаемости и проницаемости грунта.

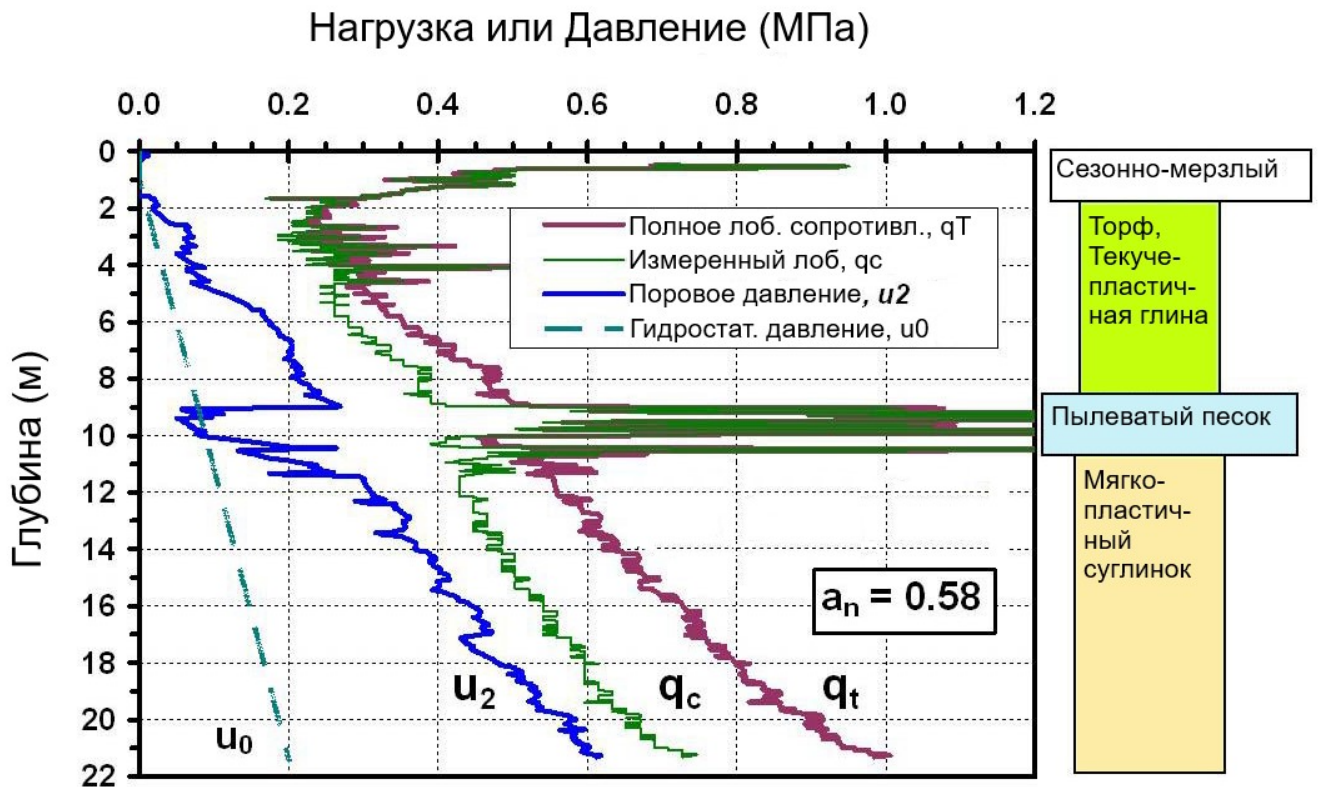


Рисунок 22 — Пример влияния избыточного u_2 на показания лобового сопротивления q_c [92]

Испытание на диссипацию может быть выполнено на любой необходимой глубине путем остановки движения зонда и измерения рассеивания давления поровой жидкости во времени. Как отмечено ранее при внедрении зонда в песчаный грунт избыточного порового давления, как правило, не возникает, однако в глинистом грунте процесс диссипационного испытания позволяет выявить характер рассеивания избыточного давления и для этого в некоторых случаях используется фиксированный период рассеяния, а иногда рассеивание продолжается до заданного процента или степени рассеяния (U), которое выражается соотношением:

$$U = \frac{u_t - u_0}{u_i - u_0} \cdot 100\% , \quad (17)$$

где, u_t — давление в момент времени t ; u_0 — гидростатическое поровое давление в массиве; u_i — давление в момент времени t_0 (начало записи). Рекомендуется продолжать диссипацию до наступления момента, когда будет достигнуто не менее $U=50\%$.

Для точного установления гидростатического давления в массиве грунта диссипация продолжается до достижения равновесных значений порового давления, когда дальнейшее рассеивание давления не наблюдается. В песках это может произойти быстро, в течение нескольких минут, в глинистых грунтах может занять несколько часов или даже дней.

Автором были выполнены длительные измерения диссипации порового давления в глине юрского возраста (Рисунок 23) в районе г. Звенигород (Звенигородская биостанция МГУ). На рисунке видно, что диссипация порового давления выполнялась на протяжении почти 15 часов и за это время была достигнута стабилизация показаний датчика зонда. Начальное поровое давление было равно 50,0 кПа, затем давление достигает максимального значения 185,0 кПа, стабилизированное (гидростатическое) давление же составило 23,5 кПа на глубине 6,6 м. В дополнение к более точной оценке механических свойств данной глины на основе полученных данных можно судить о коэффициенте переуплотнения, а также рассчитать коэффициент фильтрации. В рассмотренном примере коэффициент фильтрации юрской глины составляет примерно 0,00012 м/сут.

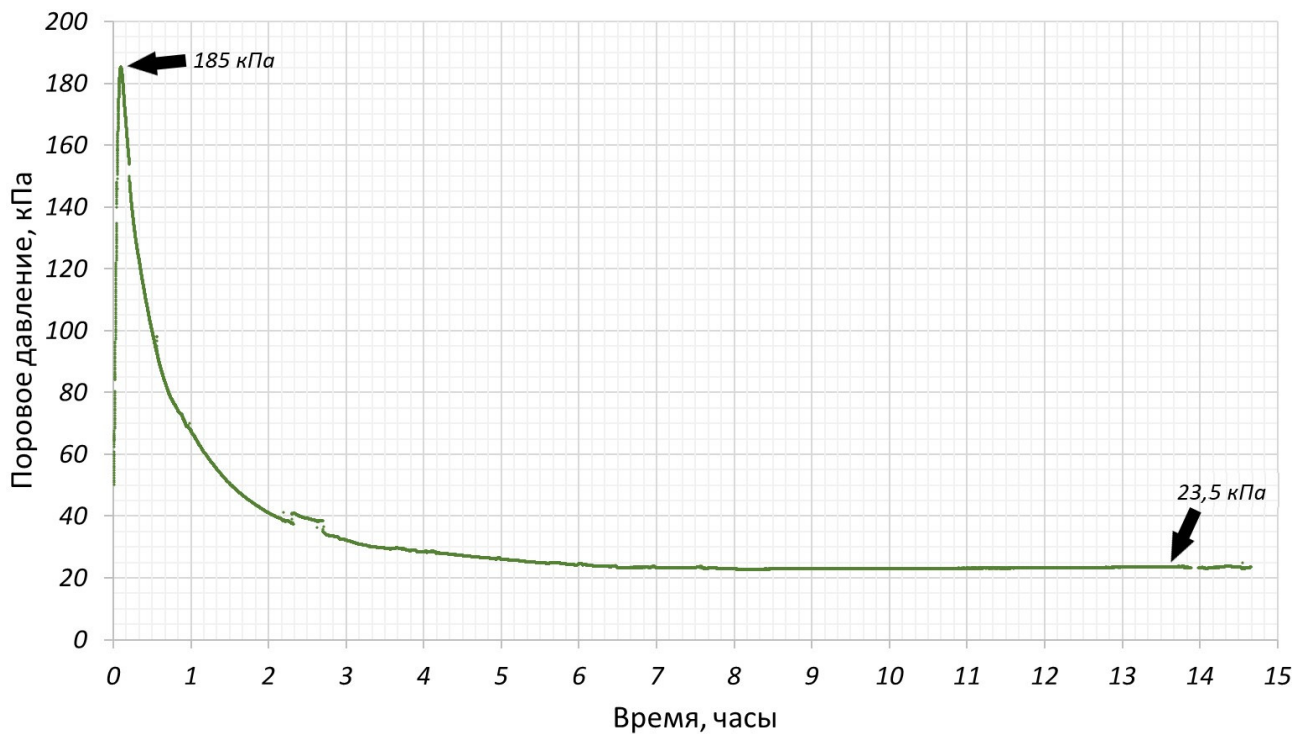


Рисунок 23 — График измерения диссипации порового давления в глине (данные автора)

При выполнении статического зондирования мерзлого грунта показания датчика порового давления служат контрастным индикатором состояния грунта — талый/мерзлый, поскольку чувствительно реагируют на наличие льда в массиве грунта. Это особенно важно при испытаниях засоленных мерзлых грунтов и высокотемпературной мерзлоты при температуре грунтов близкой к началу замерзания.

Проведение статического зондирования с измерением удельного электрического сопротивления (RCPTU) регистрирует те же измерения, что и тест статического зондирования с измерением порового давления (CPTU), который описан выше, и дополнительно в процессе внедрения зонда осуществляется измерение удельного электрического сопротивление грунта.

Измерение объемного удельного электрического сопротивления грунта выполняется дополнительным модулем (называемым модулем удельного сопротивления), который находится за стандартным конусом статического зондирования.

Термин «удельное сопротивление» используется для описания измерений удельного сопротивления грунта, поровой воды и газовой фазы. На измерения удельного электрического сопротивления влияют следующие факторы [103]:

- степень влажности;
- ионный состав поровой влаги;
- пористость;
- температура;
- форма пор;
- катионообменная емкость скелета грунта.

В насыщенных влагой грунтах на удельное электрического сопротивление в первую очередь влияет электрическая проводимость через поровую воду, которая является функцией ионного состава поровой влаги и объема пор. В относительно ненасыщенной зоне грунтового массива влияние удельного сопротивления скелета грунта (которое значительно больше, чем у поровой жидкости) возрастает по сравнению с электропроводностью поровой воды. Также и газовая фаза в порах действует как изолятор и, как правило, приводит к гораздо более высоким значениям удельного электрического сопротивления в зоне с низким содержанием поровой влаги.

Принцип работы установки заключается в том, что переменное напряжение, которое подается на электроды, приводит к перемещению содержащихся в грунте и поровой влаге ионов, что создает электрический ток i . Существует две основные схемы измерения падения напряжения: двух и четырех-электродная (Рисунок 24).

В первом случае падение напряжения $U_{вых}$ измеряется между токовыми электродами, а в четырех-электродной схеме для измерений используют дополнительную пару потенциальных электродов. Падение напряжения $U_{вых}$ является индикатором проводимости грунтовой среды.

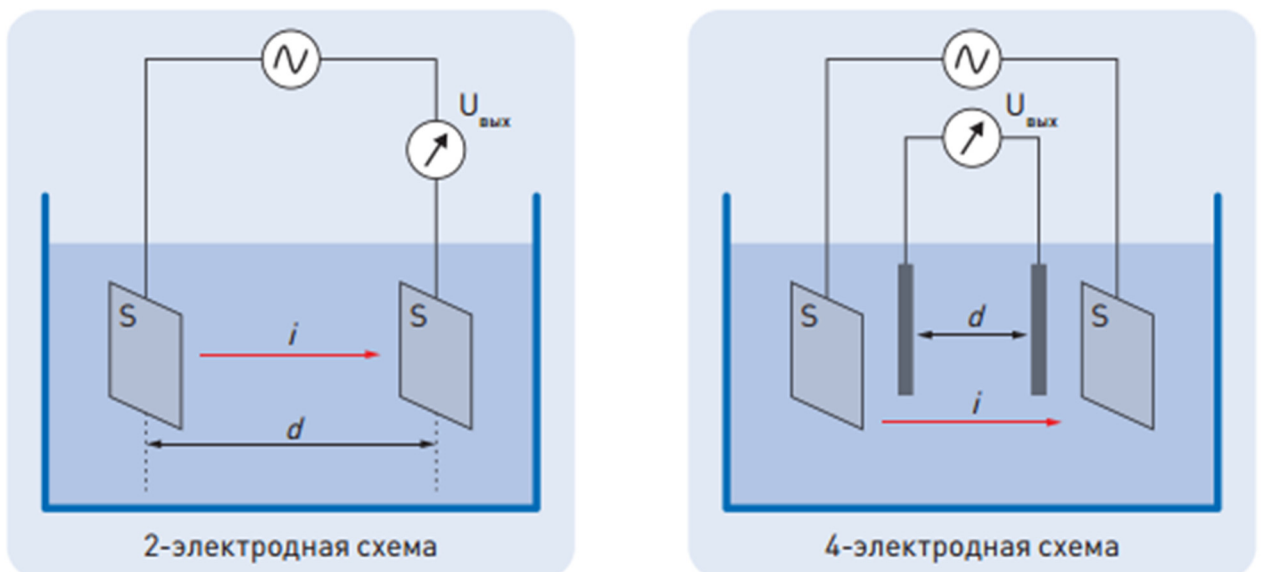


Рисунок 24 — Схема работы установки измерения электропроводности [25]

Удельное электрическое сопротивление, возникающее в заданной ячейке, есть величина обратная электропроводности σ . Ячейкой называют объем, ограниченный токовыми электродами, которые имеют площадь S и удалены друг от друга на расстояние d . Значения S и d определяются геометрией датчика, поэтому являются неизменными и выражаются через константу ячейки k :

$$k = d/S - \text{константа ячейки, см}^{-1}.$$

Таким образом, удельная проводимость вычисляется по формуле:

$$m\sigma = k/R \text{ или } \sigma = \frac{k \cdot i}{U_{\text{вых}}}, \text{ где переменной является напряжение } U_{\text{вых}}.$$

Проводимость определяется как концентрацией ионов, содержащихся в поровом растворе, так и их составом. Оба эти параметра зависят от температуры раствора, поэтому измерение электрической проводимости должно проводиться совместно с контролем температуры. Поскольку и концентрация ионов, и их подвижность зависят от температуры, при измерении проводимости необходимо знать температуру.

В зондах, производимых компанией Фугро, датчики измерения удельного электрического сопротивления грунта установлены на зонде для статического зондирования выше муфты измерения трения (Рисунок 25б) и также основаны на принципе работы установки вертикального электрического зондирования (схема Веннера) в двух-электродном исполнении.

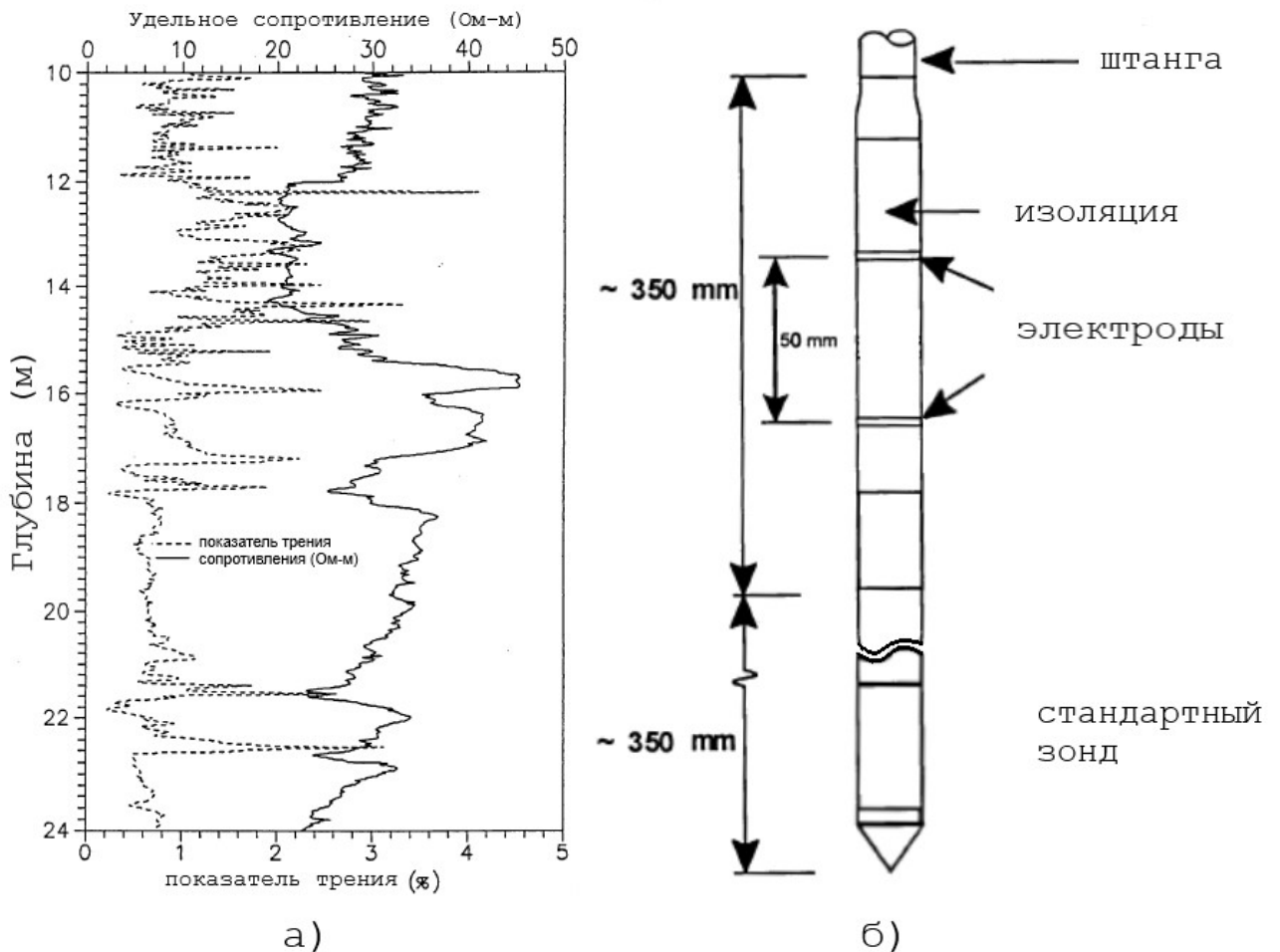


Рисунок 25 — Измерение удельного электрического сопротивления грунта: а) график удельного сопротивления; б) схема расположения датчиков на зонде [89]

Рисунок 25а иллюстрирует пример изменения удельного электрического сопротивления грунта по глубине и его соотношение с показателем трения грунта, измеренным датчиками зонда статического зондирования. Как видно профиль электросопротивления изменяется на протяжении разреза, что в дополнение к уже перечисленным возможностям дает дополнительный источник информации для расчленения разреза по статическому зондированию. Как отмечалось выше, датчик электропроводности реагирует на изменение концентрации ионов в массиве грунта, что в случае испытаний мерзлых засоленных грунтов помогает точнее регистрировать границы изменения засоленности грунтов и позволяет определять степень засоления каждого слоя грунта в отдельности.

2.4 Опыт применения статического зондирования в мерзлых грунтах

Впервые метод статического зондирования на вечной мерзлоте был опробован в 1974 г. канадским исследователем Бранко Ладаным [87, 88] при испытании пластичномерзлой ленточной глины с температурой $-0,1 - -0,3^{\circ}\text{C}$.

Площадка исследования располагалась в зоне распространения островной мерзлоты в обширной долине, выходящей к северной оконечности озера Гийом-Дэлис вблизи населенного пункта Умиуджак на восточном побережье Гудзонова залива, Северный Квебек, Канада (Рисунок 26а) [85, 87, 88].

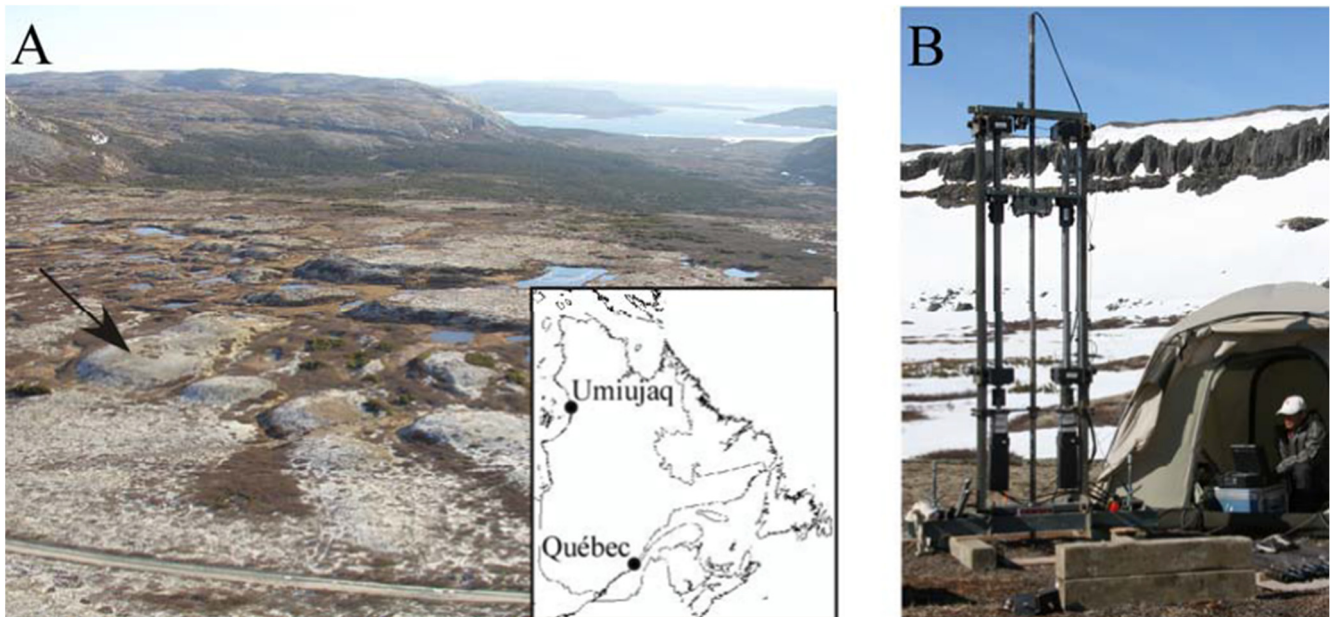


Рисунок 26 — а) поле бугров пучения, стрелкой обозначена точка зондирования; б) площадка зондирования и специализированная установка [85]

Ледниково-морские отложения накапливались в основании долины и в результате поднятия из-за гляциоизостатического отскока, блок этих отложений был перекрыт песками. После выхода на поверхность четвертичные отложения вошли в соприкосновение с холодным арктическим воздухом, в результате чего образовалась сильнольдистая мерзлая толща и на дне долины образовалось поле бугров пучения. Такие приподнятые перигляциальные формы рельефа обусловлены образованием сегрегационного льда и последующим морозным пучением. Бугры пучения достигают в диаметре нескольких десятков метров. Вершины этих бугров находятся в нескольких метрах над поверхностью земли и не затронуты вечной

мерзлотой. Там, где в долине обнажаются ледниково-морские отложения, мощность вечной мерзлоты может достигать 20 м.

Зондирование осуществлялось с помощью гидравлической установки, с применением зонда «Фугро» диаметром 35,7 мм. В процессе испытаний фиксировалось только сопротивление грунта под конусом зонда. Общее усилие вдавливания оборудования составляло всего 30 кН, транспортное устройство во время испытаний закреплялось в грунт парой винтовых свай. В своих экспериментах Б. Ладаный применял две методики испытаний. Первая — так называемое «квазистатическое» испытание (термин введен Б. Ладаным), осуществляемое при весьма малых хорошо контролируемых скоростях погружения зонда. Вторая — испытание ступенчато увеличивающимися нагрузками с поддержанием постоянной нагрузки на ступени в течение заданного промежутка времени (в опытах Б. Ладаного — 15 мин). Задаваемые и наблюдаемые скорости зондирования изменялись от 0,0025 до 2,5 см/мин.

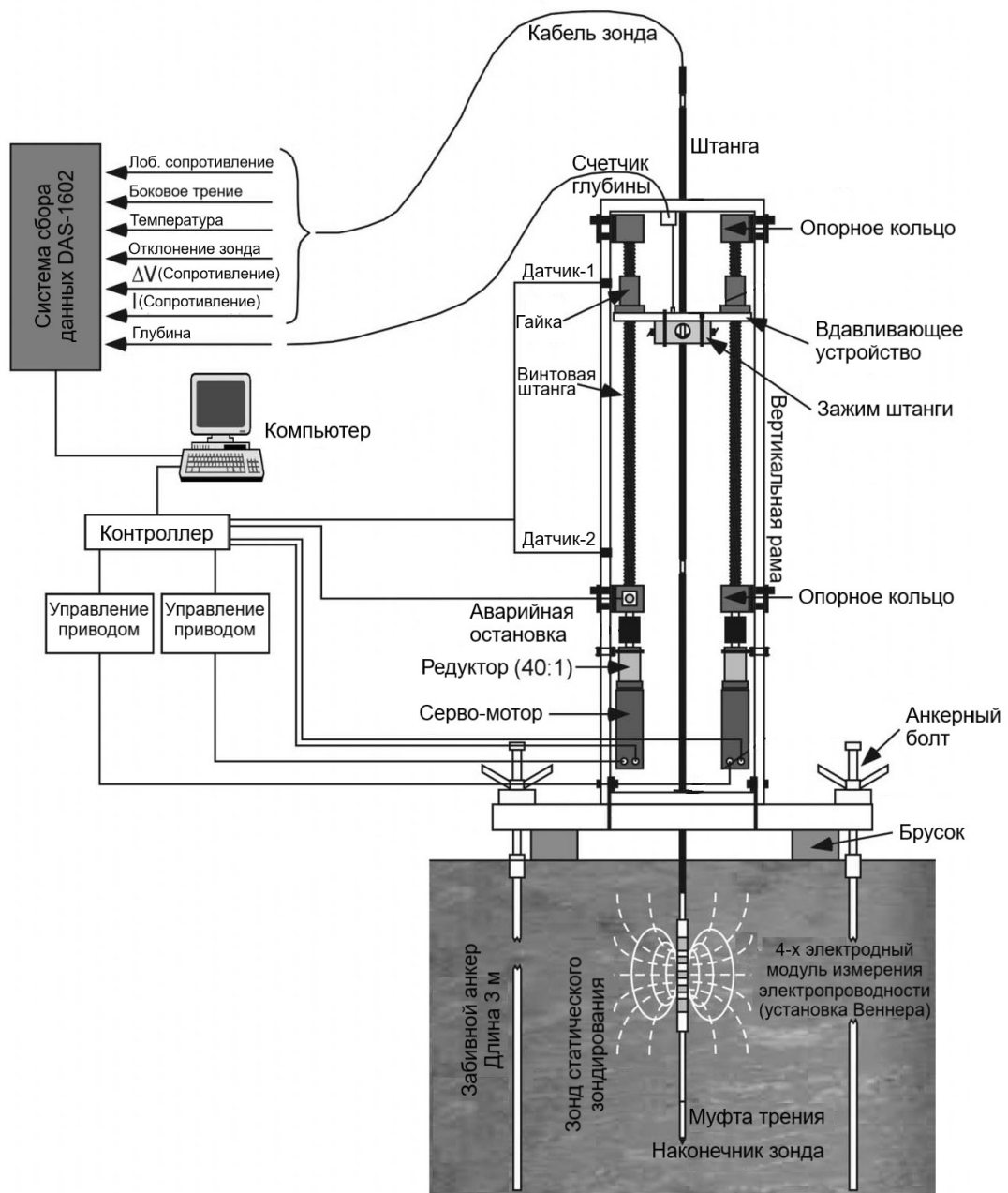


Рисунок 27 — Принципиальная схема электрической установки статического зондирования [85, 87, 88]

В дальнейшем работы по исследованию свойств мерзлых грунтов методом статического зондирования были продолжены канадским исследователем Ричардом Фортье [85]. Для выполнения исследований была сконструирована специализированная электрическая установка статического зондирования (Рисунок 27). В составе установки были задействованы 2 электромотора и редукторы понижающей передачи, позволявшие очень точно регулировать скорость погружения зонда в грунт.

В ходе эксперимента статическое зондирование выполнялось по технологии точного контроля скорости и с измерением электропроводности, порового давления и температуры грунтов — «rate controlled RTCPTu». Погружение зонда проводилось на скорости около 0,1 см/с, что в 20 раз меньше стандартной скорости погружения. Для выполнения экспериментов был использован зонд-конус производства компании Вертек (Vertek), имеющий следующие характеристики: 10 см² — площадь основания, 35,7 мм — диаметр, 60° — угол наконечника, датчик порового давления — u_2 — сразу за наконечником, 150 см² — площадь муфты трения, датчик электрического сопротивления — четырехэлектродная установка Веннера, и датчик температуры в наконечнике зонда [83, 84].

Было установлено, что прочность мерзлого грунта существенно зависит от скорости деформации, которая возникает и развивается вслед за ползучим поведением льда. Для построения точного стратиграфического профиля скорость зондирования должна точно контролироваться. Кроме того, при более низкой скорости зондирования, чем стандартная, лобовое сопротивление ниже, а, следовательно, задавливающая система испытывает меньшие нагрузки. Для оценки ползучести мерзлого грунта на глубине 5,9 м был также проведен тест на ползучесть — ряд квазистатических RTCPTu-испытаний с поэтапным увеличением скорости вдавливания от 0,0001 до 0,035 см/с.

Максимальная глубина зондирования составила 15,8 м, отказ был получен в результате контакта с коренными скальными породам. Деятельный слой мощностью 3,5 м с электрическим сопротивлением свыше 10 кОм×м, сложен песками. Тонкий слой талых супесей интерпретирован как талик в толще между песками активного слоя и кровлей многолетнемерзлых пород. Подошва многолетнемерзлых грунтов обнаружена на глубине 13,5 м по резкому падению показателей лобового сопротивления, электрического сопротивления, и порового давления до значений характерных для глинистых грунтов в не мерзлом состоянии ниже подошвы мерзлоты. Мощность мерзлого слоя составляет около 9,6 м. Непосредственно под подошвой мерзлоты распространен прослой мерзлой супеси, мощностью 0,45 м, который перекрывает ледяную линзу мощностью 0,6 м. Также было установлено, что сетчатая криотекстура образована переслаиванием сантиметровых линз льда и мерзлого грунта. Для такого сильно-льдистого мерзлого грунта характерна экстремальная изменчивость измеряемых параметров: так, например лобовое сопротивление варьировало от 5 до 50 МПа, показатель трения от 0,01 до 2 %, поровое давление от около нулевых значений до 10 МПа, и электрическое сопротивление изменялось от 0,01 до 20 кОм×м.

На каждой новой ступени скорости погружения зонда лобовое сопротивление полностью нарастает лишь после нескольких минут движения. Зависимость прочности мерзлого грунта от скорости деформации может быть оценена следующим степенным соотношением:

$$\frac{q_c}{q_{c0}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_c}{\dot{\epsilon}_{c0}} \right)^{1/n} \quad (18)$$

где $n = 5.2$ – степень ползучести, $q_{c0} = 15.2$ МПа измеренное лобовое сопротивление при скорости $s_{c0} = 0.1$ см/с.

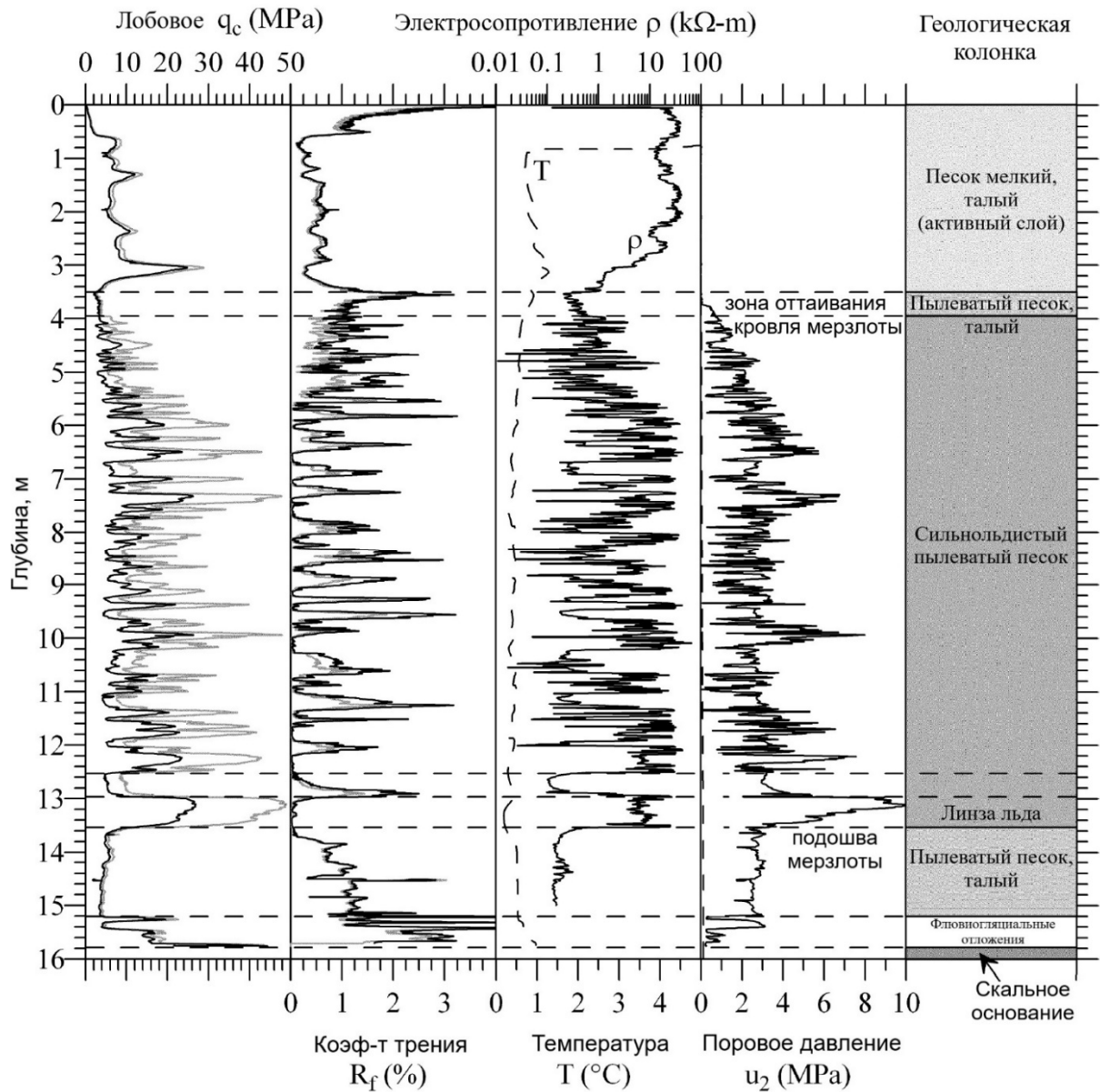


Рисунок 28 — Результаты статического зондирования с описанием грунта, полученные Р. Фортье [85]

Для стандартной скорости зондирования 2 см/с, лобовое сопротивление равно 27,1 МПа, что соответствует поправочному коэффициенту 1,78. Поскольку чувствительность к скорости деформации у немерзлого грунта достаточно низкая, также была сделана коррекция данных зондирования в активном слое и немерзлых грунтах ниже подошвы мерзлого слоя, но для степени ползучести 20, что дало поправочный коэффициент 1,16.

Описанная коррекция была необходима в виду того, что при оценке поведенческого типа грунта используются классификационные диаграммы, построенные для скорости погружения зонда 2 см/с.

Вследствие нагрева зонда при погружении в грунт, температура, замеренная в процессе задавливания, не является истинной температурой грунта. После остановки задавливания на глубине 5,9 м, сразу после теста на ползучесть была выполнена температурная стабилизация зонда. Температура понизилась примерно на 1 С, с 0,82 С до – 0,12 С за 52 минуты. Таким образом, температура сильно-льдистого мерзлого грунта близка к – 0,1 С.

Следующим этапом изучения мерзлых грунтов методом статического зондирования была оценка поведенческого типа грунта. Для этого были взяты 3 классификационные диаграммы для немерзлых грунтов, также были рассчитаны 5 различных параметров, основой для расчета которых служит не скорректированное лобовое сопротивление – q_c (рассчитанные параметры: q_t , Q_{tl} , q_{eff} , R_f , F_r):

$$q_t = q_c + u_2(1 - \alpha), \quad (19),$$

$$R_f = \frac{f_s}{q_t} 100\% , \quad (20),$$

$$Q_{tl} = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}}, \quad (21),$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} 100\%, \quad (22),$$

$$q_{eff} = q_c - \alpha \cdot u_2, \quad (23),$$

где α – постоянная зонда, σ_{vo} – бытовое давление, σ'_{vo} – эффективное напряжение.

На основе данных зондирования было выделено 7 слоев с различными поведенческими типами, включая мощные линзы льда и слои слабо-льдистой мерзлой супеси в толще сильно-льдистого мерзлого грунта.

В сильно-льдистом грунте трение по муфте достаточно низкое, нижний предел нормализованного коэффициента трения F_r на диаграмме нормализованного поведенческого типа грунта составляет 0,01 % вместо 0,1 %. Лобовое сопротивление возрастает (с 3 МПа для немерзлого грунта до 10 МПа для сильно-льдистого, и до 50 МПа для льда в случае лобового сопротивления скорректированного с учетом порового давления – q_t с 50 до 70 и 300 МПа соответственно для нормализованного лобового сопротивления – Q_{tl} с 3 МПа до 7 МПа и до 40 МПа соответственно для эффективного лобового сопротивления – q_{eff}) при этом коэффициент трения снижается (с 1,5% для немерзлого грунта до 1% для слабо-льдистого мерзлого грунта и далее до 0,01% для льда в случае скорректированного показателя – R_f ; с 1,5% для немерзлого грунта до 1% для слабо-льдистого мерзлого грунта и далее до 0,05% для льда в среднем, в случае нормализованного показателя трения – F_r ; изменчивость значений по муфте трения 5 – 175 кПа) с ростом количества ледяных контактов и содержания льда в мерзлом грунте. Рассеяние в лобовом сопротивлении, коэффициенте трения и трении по муфте обусловлено сложной последовательностью толстых ледяных линз и слоев мерзлого грунта с низким содержанием льда.

На основе выполненного на бугре пучения статического зондирования в высокотемпературной сильнольдистой мерзлоте, сложенной супесями с температурой около – 0,1°С автором установлено, что сетчатая криотекстура обуславливает экстремальную изменчивость параметров. Лобовое сопротивление и коэффициент трения, приведенные с учетом порового давления к скорости вдавливания 2 см/с, поровое давление и электрическое

сопротивление достигают больших величин в условиях льда и снижаются при прохождении слоев мерзлого грунта.

Р. Фортъе были предложены новые разделы на классификационных диаграммах поведенческого типа грунта основанные на нормализованных показателях лобового сопротивления и коэффициента трения для определения линз льда, слабо и сильнольдистых разностей мерзлого грунта. Диаграммы (Рисунок 29) охватывают следующие типы грунтов: а) немерзлый грунт; б) сильнольдистый мерзлый грунт; в) немерзлый грунт; д) сильнольдистый мерзлый грунт. Доказано, что метод может быть эффективен не только для оценки условий залегания дисперсных мерзлых грунтов, но также для изучения ползучести мерзлых грунтов при испытаниях серий квазистатических RTCPTu со ступенчатым изменением скорости вдавливания зонда.

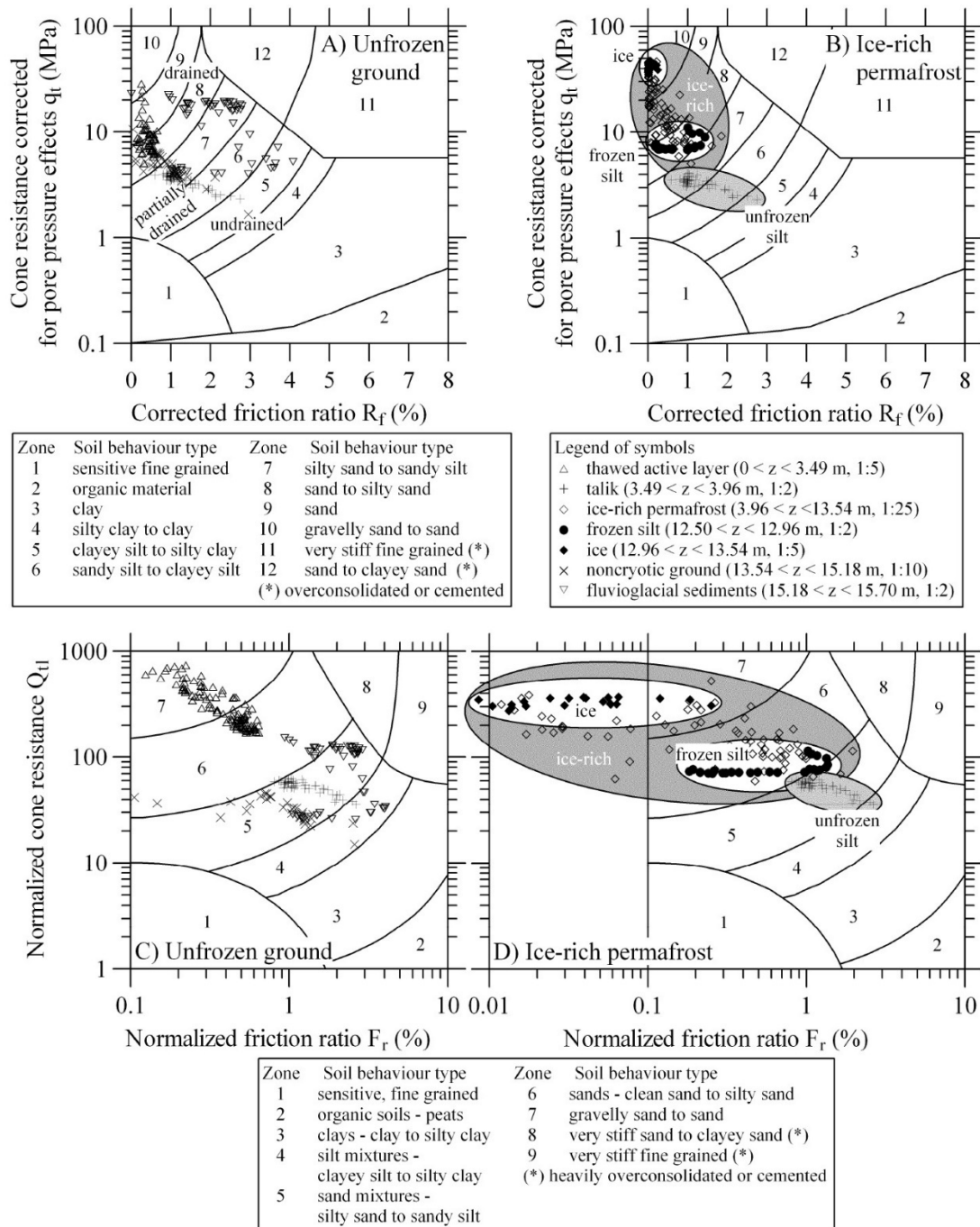


Рисунок 29 — Диаграммы оценки поведенческого типа грунта [85]

Другим исследователем, внесшим свой вклад в изучение применения статического зондирования для полярных регионов, является Адриан МакКаллум [90, 91]. Его работы по исследованию Антарктического снега и льда ставили своей целью апробирование метода статического зондирования в полярных условиях и изучение процессов, проходящих при испытаниях. Для этого измерительное оборудование было смонтировано на специализированную рабочую платформу на антарктической научной станции и проведен ряд испытаний. Средняя температура в регионе выполнения исследований составляет -30°C , летом температура может достигать 0°C , годовое накопление снежного покрова до 1,2 м. Следует отметить, что статическое зондирование с измерением лобового сопротивления и трения по боковой поверхности проводилось в полярном снегу впервые. В связи с этим был поставлен ряд вопросов, требующих разрешения для правильной оценки параметров, таких как прочность снега, замеренная при помощи статического зондирования. МакКаллумом было установлено, что метод хорошо подходит для быстрой оценки свойств полярного снега при решении задач изысканий под объекты инфраструктуры в полярной зоне и позволяет существенно сэкономить время и ресурсы при изысканиях в таких суровых регионах.

Все оборудование было размещено в металлическом контейнере размером $1,7 \times 1,45 \times 1,35$ м общей массой 1300 кг (Рисунок 30), где а — задавливающее устройство, б — верстак, с — жесткая балка (требуется для увеличения реакции от собственного веса трактора). Для выполнения экспериментов использовался зонд диаметром 35,7 мм с датчиком порового давления, максимальное измеряемое усилие вдавливания составило 40 МПа. Для внедрения зонда использовалась гидравлическая система из 2 гидроцилиндров с общим усилием вдавливания до 4 т [91].

Опыты выполнялись с разными скоростями, в интервале от 0,16 до 55 мм в секунду [90]. Испытания проводились с учетом погодных и технических условий, а также проектировались для изучения многочисленных факторов, влияющих на интерпретацию данных, включая локальные особенности снежного покрова, плотность различных слоев снега, эффекты зависящие от скорости внедрения, влияние давления вдавливания на сопротивление наконечника и муфты трения, и другие. Выполненные исследования показывают хорошую зависимость лобового сопротивления и трения по боковой поверхности от скорости внедрения зонда в фирн (Рисунок 31). Было проведено несколько тестов с использованием зонда другого размера, чтобы показать, что это не приводит к изменениям в измеренном лобовом сопротивлении. Установлена хорошая корреляция между лобовым сопротивлением и плотностью снега. Сопротивление изменяется в пределах каждого слоя, из-за расстояния, необходимого для достижения сопротивления устойчивости, но изменения сопротивления хорошо согласуются с изменениями плотности. Также происходит увеличение уплотненности и укрепление связей в снегу без изменения плотности. Установить взаимосвязь между данными по трению и плотностью оказалось не так легко. Как видно, трение растет с плотностью. Значения величин как трения, так и плотности увеличиваются с глубиной, хотя значения трения увеличиваются с большей скоростью. Наблюдаемое увеличение значений трения, связано с плотностью, обусловленной увеличением нормальной силы, действующей на муфту трения. Это вызвано более плотной упаковкой частиц по мере увеличения плотности снега. Установлено также, что форма наконечника зонда также влияет на измеряемые параметры. Для

проверки этого было выполнено несколько тестов с плоской пластиной, имеющей площадь, идентичную площади стандартного наконечника с углом при вершине в 60° . В результате этих тестов установлено, что плоское основание дает большее лобовое сопротивление, чем наконечник с углом в 60° на зондах одинакового диаметра. Также установлено, что размер зерна материала может влиять на эффективную площадь зонда.



Рисунок 30 — Оборудование для статического зондирования на базе тяжелого трактора, смонтированное на навесное устройство [90, 91]

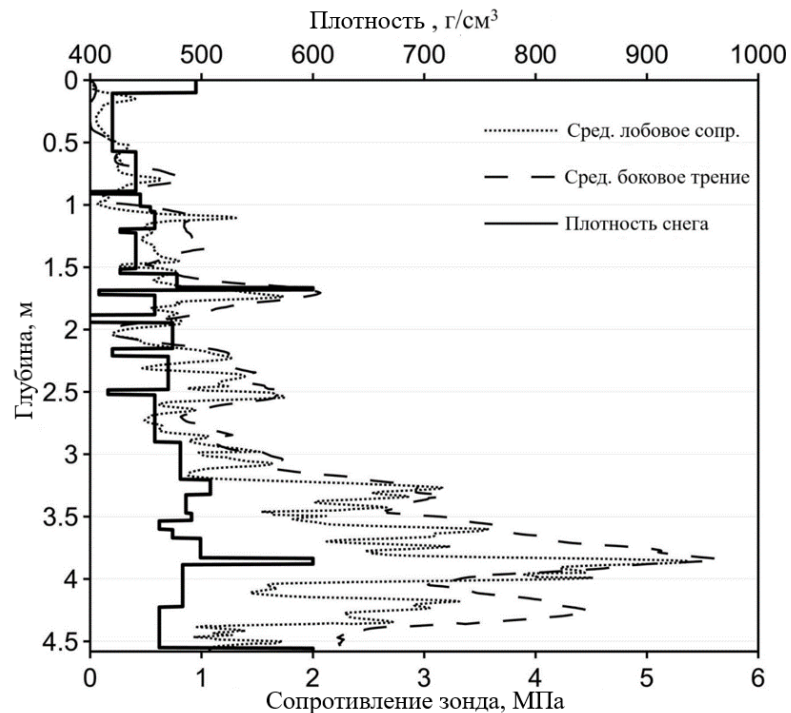


Рисунок 31 — Среднее сопротивление наконечника и муфты трения зонда, полученные с учетом измеренной плотности снега в шурфе [91]

Для исследования «эффекта вскрышного давления» на лобовое сопротивление и трение три пары тестов были выполнены на небольшом расстоянии друг от друга. При этом для каждой пары замеров было удалено разное количество грунта. Замеры выполнялись со скоростью вдавливания 25 мм в секунду до глубины 3 м, но вскрыша была удалена бульдозером в первой и второй парах испытаний. Было выполнено около 190 замеров. Сравнение проводилось между лобовыми сопротивлениями и трениями лишь для последнего метра каждого теста. Данный эксперимент показал хорошую зависимость «вскрышного эффекта» и измеренных показателей зондирования. Возможно, что увеличение нагрузки на вскрышу может иметь большее влияние на трение, чем на лобовое сопротивление (где нормальное напряжение может иметь меньший эффект из-за связанного предварительного разрушения скелета снега). Наблюдается уменьшение трения на 40% при уменьшении давления вскрыши, после удаления 2 м вскрыши. Это свидетельствует о том, что вскрышные породы и возникающие при этом вертикальные напряжения могут влиять на нормальное напряжение на муфте трения и, следовательно, на измеренное трение (в снеге такой же плотности и микроструктуры). Однако известно, что давление, которое обычно оказывают лыжники (1–5 кПа), кажется незначительным для изменения трения при повышенной нагрузке. Это следствие истинной площади контакта пропорциональное нагрузке. Такой эффект может иметь место на поверхности естественного альпийского снега. Предполагается, что во время внедрения зонда обработанный, переупакованный, уплотненный снег рядом с муфтой имеет в основном однородную структуру, так что любое увеличение нормального давления приведет к увеличению трения.

В процессе экспериментов делались попытки качественной оценки формирования зоны уплотненного снега перед зондом. Для наблюдения за внедрением зонда и поведением снега под его наконечником был выполнен специальный надрез в параллельной, внедрению зонда, плоскости. Несмотря на нарушение естественного сложения снега, удалось наблюдать поведение снега под наконечником и измерить зону уплотнения снега после внедрения зонда. Установлено, что в процессе внедрения зонда происходит смещение частиц снега перпендикулярно плоскостей наконечника и уплотнение частиц вдоль боковой поверхности зонда. Данное наблюдение совпадает с установленным фактом, что основная траектория движения материала под наконечником зонда это смещение и уплотнение частиц вдоль боковой поверхности. При использовании плоской пластины на ней во время испытаний формировалась уплотненная зона снега (приближающаяся к плотности льда). Хотя, рассматриваемый снег был очень сухим и, вероятно, не подверженным склеиванию, перед плоской пластиной происходит разрушение, уплотнение и затем плавление снега под давлением. Давление во время зондирования плоской пластиной приближалось к 10 МПа.

В заключение описания исследований А. МакКаллума [90, 91] следует отметить следующее: собранное оборудование позволило с высокой точностью выполнить статическое зондирование в полярной области. Данные, полученные при выполнении статического зондирования в снегу, позволили проверить и уточнить ряд гипотез, связанных с поведением зонда при внедрении его в зернистую среду с отрицательной температурой. Это позволит в будущем более точно проводить стратиграфические исследования, измерения плотности и прочности снега. Показаны подходы к интерпретации данных и описаны возможные эффекты,

возникающие при зондировании снега. Показано, что статическое зондирование хорошо подходит для быстрой оценки свойств снега, при изысканиях в полярных областях.

Опыт советских исследователей заключался в том, что с конца 60-х годов при работе установкой С-832М [32, 41, 48, 53] в немерзлых грунтах был предложен метод прерывистого зондирования, получивший название зондирование со «стабилизацией». Суть метода в том, что на заданной глубине прекращается подача жидкости в систему вдавливания зонда и движение его быстро замедляется, при это сопротивления грунта уравнивается, что подробно описано в РСН 33-70 [75]. Сегодня в зарубежной практике прерывистое задавливание широко используется для оценки коэффициента фильтрации грунта, где измеряется диссипация (рассеивание) избыточного порового давления, вызванного пенетрацией зонда. Подробно методика измерения описана в ASTM D6067 / D6067M-17 [105], а также у ряда авторов, занимавшихся этой темой [93].

Впервые прерывистое задавливание на мерзлых грунтах было применено в 80-е годы Ф.Е. Волковым, О.Н. Исаевым, М.А. Минкиным и другими специалистами [12, 32, 33, 48, 52]. Методика испытания зондированием со «стабилизацией», которая ими использовалась, рекомендует применять установку С-832М для зондирования со «стабилизацией» для определения несущей способности забивных свай на основе сопротивления грунта в состоянии предельного равновесия на различных интервалах точек по глубине 0,5 или 1 м в зависимости от мощности пластов, обладающих различной несущей способностью. За критерий стабилизации принимают момент, когда в течение 2 мин. на диаграммных лентах не наблюдают изменения величин лобового и бокового сопротивлений. Однако отмечалось, что массовому применению статического зондирования мерзлых грунтов по этой методике препятствует несовершенство существующих методов проведения и обработки испытаний, в частности недостаточно полный учет реологических свойств мерзлых грунтов, их сильная зависимость от температуры и длительности приложения нагрузки. Для изучения влияния реологии на получаемые результаты были выполнены экспериментальные работы по статическому зондированию прибрежно-морских пластичномерзлых суглинков в г. Лабытнанги и флювиогляциальных пластичномерзлых суглинков в г. Воркута. В ходе этих работы были выполнены испытания мерзлого грунта в «релаксационно-ползучем режиме» для учета реологии. Был представлен ряд работ по разработке методов интерпретации этих данных и расчетам несущей способности свай [12, 32, 33, 42, 52], однако дальнейшего развития и широкого применения не получил. По-видимому, имела место неудача в попытке обработки получаемых результатов. Отмечено, что «... вопрос определения предельного сопротивления мерзлого грунта вдоль боковой поверхности свай с использованием статического зондирования является весьма сложным и до настоящего времени изучен недостаточно».

Выводы

1. Статическое зондирование является одним из основных методов в инженерно-геологических и геотехнических изысканиях для дисперсных грунтов. В отечественной практике инженерно-геологических изысканий данный метод интенсивно развивается в последние годы, находя новое применение для глубин исследования более 20 м, для проведения работ в акваториях рек и морских прибрежных зон, для получения информации о поровом давлении в глинистых грунтах, как связующее звено между геофизическими методами и инженерно-геологическим бурением.
2. Статическое зондирование является перспективным методом для исследования многолетнемерзлых грунтов. Проведенный обзор мирового опыта зондирования многолетнемерзлых грунтов показывает, что подход к выполнению испытаний, при котором ведется последовательное уменьшение скорости зондирования до очень малых значений с целью компенсации проявлений вязко-пластичных свойств мерзлого грунта не дает необходимых результатов. Испытание увеличивается во времени, существенного влияния на получаемые результаты не происходит. Снижение скорости внедрения зонда в грунт сводит на нет основное преимущество статического зондирования, как экспресс-метода испытания грунтов.
3. Выдвинутый советскими инженерами в 60–70-е годы подход, проведения испытаний с остановками (зондирование со стабилизацией), выглядит более перспективным в связи с тем, что в ходе испытаний могут быть получены 2 набора данных: без стабилизации (при скорости 2 см/с) и со стабилизацией, когда считываются показания неподвижного зонда в состоянии предельного равновесия. В 80-е годы была попытка применения этого подхода для испытаний многолетнемерзлых грунтов в так называемом «релаксационно–ползучем режиме» под нагрузкой. Однако он не получил развития ввиду неудачи в попытках интерпретации получаемых результатов.
4. Для дальнейшего развития метода необходимо:
 - а. расширить перечень измеряемых параметров на основе современного цифрового оборудования для сбора данных,
 - б. разработать теоретическую основу метода испытаний многолетнемерзлых грунтов,
 - в. улучшить алгоритм сбора и полевой интерпретации получаемых данных
 - г. разработать методику обработки получаемых данных с учетом специфики многолетнемерзлых грунтов.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ С ПОМОЩЬЮ ЗОНДА С ТЕМПЕРАТУРНЫМ ДАТЧИКОМ

3.1 Существующая методика замера температуры мерзлого грунта

Известно, что температура мерзлого грунта существенно влияет на его механические свойства. Это обуславливает необходимость точных замеров температуры грунтов на площадках проектируемых сооружений. Для целей инженерно-геокриологических изысканий, в соответствии с ГОСТ 25358–2012 «Грунты. Метод полевого определения температуры измерения температуры» [71], замеры температуры грунта осуществляются в скважинах, оборудованных электрическими или ртутными приборами. Однако, описанная технология измерения температуры грунтов в скважинах обладает рядом недостатков.

Главным недостатком является технологическая невозможность измерения непосредственно температуры грунта, поскольку в термометрической скважине при помощи термокосы производится измерение температуры воздуха, окружающего термодатчик, а не самого грунта. Считается, что воздух в скважине принимает температуру грунта, залегающего на соответствующей глубине. В связи с этим имеются технологические ограничения на конструкцию скважины, такие как малый диаметр бурения, теплоизолированное устье, использование диафрагм между термодатчиками до глубины 5 м, исключая конвекцию воздуха. Следует отметить также то, что для измерения температуры физических тел требуется хороший контакт между измерительным прибором и телом. В случае с термокосой это условие не выполняется, что также уменьшает скорость и ухудшает качество измерений.

Другим недостатком является высокая температурная инерционность измерений температуры воздуха, а также большие возмущения теплового поля грунта в процессе бурения и обустройства скважины, требующие так называемой выстойки скважины. После проходки и обустройства скважина должна выстояться, чтобы температурный режим грунта восстановился до естественного. Встойку скважин определяют экспериментально посредством измерения температуры грунтов на глубине 5 м и ниже интервалом в 1 м. Скважина считается выстоявшейся, если изменение температуры грунтов на соответствующих глубинах за трехсуточный срок не превышает $0,1^{\circ}\text{C}$ [57]. Встойка термометрической скважины от момента устройства до получения первых релевантных замеров составляет от нескольких суток до нескольких месяцев. Допускается принимать следующие ориентировочные сроки выстойки скважин после бурения в песчаных и глинистых грунтах: до глубины 15 м — 12–15 дней, до глубины 30 м — 25–30 дней [57].

Важно также подчеркнуть, что в обычной практике геокриологических изысканий и последующего температурного мониторинга, специалисты, как правило, сталкиваются с отсутствием данных о физических и механических свойствах грунта при данной температуре, что не позволяет применять результаты измерений в термометрических скважинах для точного описания инженерно-геокриологической обстановки исследуемой площадки. Другими словами, данные по измеренной температуре грунта недостаточны для оценки напряженно-деформированного состояния грунтового массива [56, 81].

Выполнение статического зондирования вместе с измерением температуры грунтов в режиме стабилизации позволяет получить данные о температуре способом, лишенным вышеперечисленных недостатков. Современный уровень развития техники позволяет комбинировать электрический датчик для измерения температуры (термодатчик) с общепринятым в мировой практике зондом для статического зондирования [97, 98]. Такой метод измерения температуры грунтов, в соответствии с Приложением Л, СП 25.13330.2012 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» [78], допускается при использовании специализированной схемы проведения испытаний. Измерение температуры грунтов при помощи термодатчика, установленного в зонде статического зондирования, позволяет точные данные за короткое время в непосредственном контакте с грунтом, что является значением «фоновой» или «исходной» температуры. В дальнейшем при проведении повторных измерений температуры «фоновая температура» служит точкой отсчета для оценки изменения температуры грунтов, а при повторном испытании статическим зондированием и изменение механических свойств мерзлых грунтов. Полученные результаты по температуре мерзлого грунта и его механическим свойствам могут быть увязаны друг с другом для оценки температурной зависимости характеристик мерзлого грунта и использованы в рамках геокриологического прогноза состояния мерзлого грунтового массива. Метод статического зондирования с измерением температуры обладает большим потенциалом применения при проведении инженерно-геокриологических изысканий и геотехнического мониторинга [89, 100, 101, 102].

3.2 Характеристика площадки для сравнительных замеров температуры грунтов

Район опытной площадки располагается у южной границы зоны распространения многолетнемерзлых пород и сложен песками различной крупности (Рисунок 32).



Рисунок 32 — Общий вид площадки исследования (фото автора)

В мелкомасштабном плане мерзлые породы региона относятся к островному типу распространения – занимают менее 20% площади. Многолетнемерзлые грунты на рассматриваемой опытной площадке не встречены. Глубина сезонного промерзания варьирует от 2,3 м до 3,5 м. Продолжительность периода со средней суточной температурой ниже 0°C составляет 179 дней. Среднегодовая температура воздуха составляет порядка -2°C . Сумма осадков в год составляет 400-500 мм. Устойчивый снежный покров формируется в третьей декаде октября. Средние за декаду значения высоты снежного покрова изменяются от 1 до 17 см.

На опытной площадке выполнялось инженерно-геологическое бурение и испытания грунтов методом статического зондирования до глубины 11,7 м с измерением температуры (Рисунок 33).

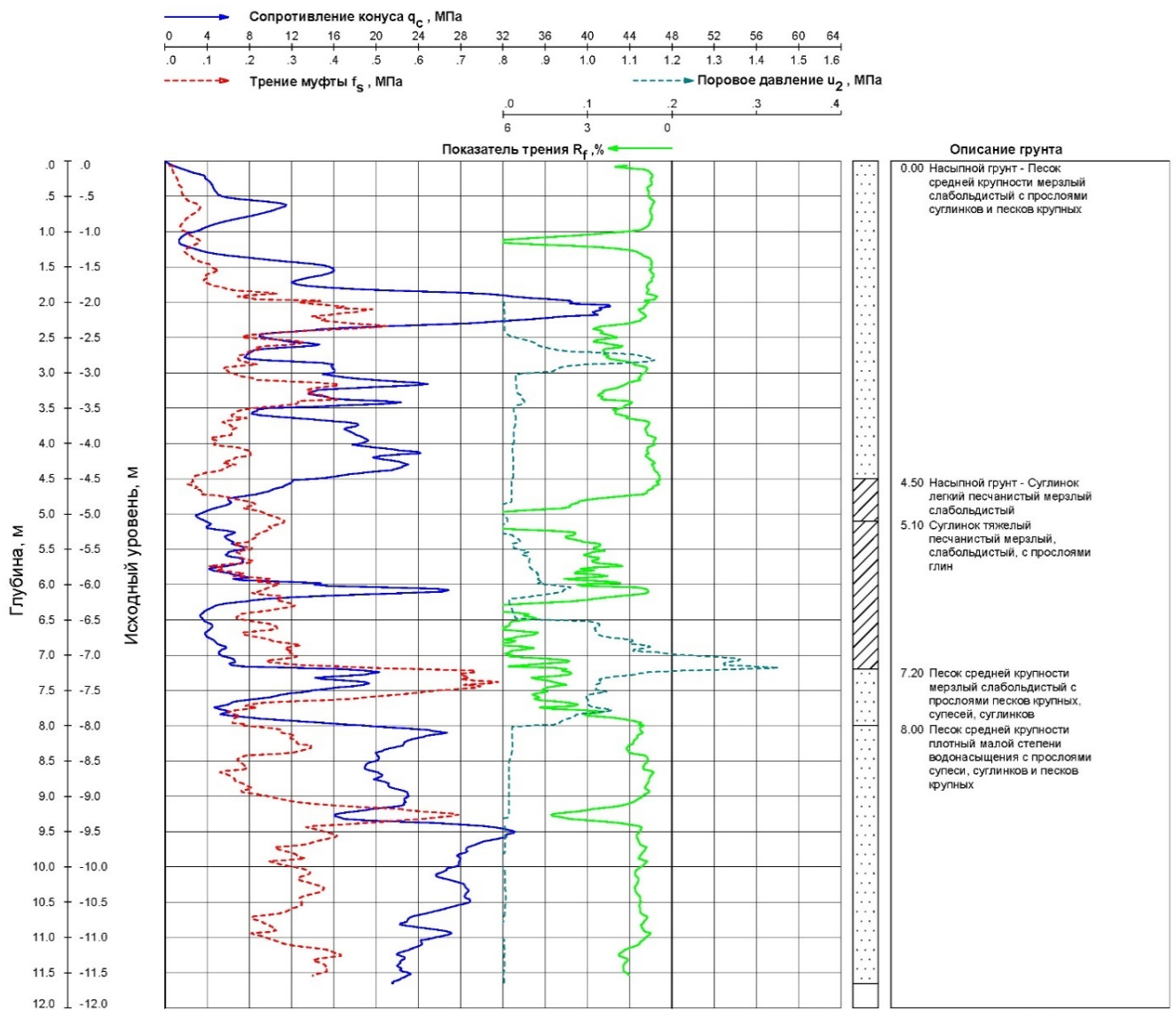


Рисунок 33 — График статического зондирования с измерением температуры, выполненный на опытной площадке

По данным проведенного инженерно-геологического бурения и статического зондирования, техногенные грунты на опытной площадке залегают с поверхности до глубины 4,5 м и представлены песками средней крупности с прослоями суглинков и песков крупных (Рисунок 33). Ниже, до глубины 5,1 м залегает суглинок легкий, песчанистый, также

техногенного происхождения. В толще техногенных грунтов встречен прослой мерзлого грунта, на момент исследования (июнь 2018 г.) залегающий с глубины 2 м на всю мощность техногенного грунта. Ниже залегают аллювиально-делювиальные (a,adN₂-QI) отложения плиоцен-нижнеплейстоценового возраста, представленные суглинками тяжелыми, песчанистыми, с прослоями глин и песками средней крупности, с прослоями крупных до глубины 8 м, которые также находятся в мерзлом состоянии. Ниже отметки 8 м встречены аллювиальные и аллювиально-делювиальные (a,adN₂-QI) отложения плиоцен-нижнеплейстоценового возраста, представленные песками средней крупности, малой степени водонасыщения, с прослоями супеси, суглинков и песков крупных. Пески находятся в талом состоянии. Данная мерзлотная грунтовая обстановка сформировалась в результате того, что работы по возведению насыпи проводились в зимний период, причем песок отсыпался без удаления слоя сезонно-мерзлого грунта и снега. В результате была сформирована техногенная толща мерзлого грунта, которая при имеющихся геокриологических условиях сохраняется в мерзлом состоянии более одного сезона.

3.3 Сравнительные замеры температуры мерзлого грунта с помощью зонда статического зондирования с температурным датчиком и скважинной термометрии

В ходе проведения научных работ и инженерных изысканий автором был накоплен большой материал по измерению температуры мерзлых грунтов с помощью статического зондирования. Однако специалисты, занимающиеся исследованием мерзлых грунтов, высказывают сомнения в корректности и точности измерений температуры грунтов методом статического зондирования. Также неоднократно было рекомендовано провести сравнительные испытания по измерению температуры мерзлых грунтов, как с помощью статического зондирования, так и с применением скважинной термометрии.

Провести корректное сравнение измерений температуры мерзлых грунтов в полевых условиях достаточно сложно. Прежде всего, это обусловлено:

1. изменением температурного режима мерзлых грунтов во времени, что требует проведения измерения температуры грунта в одно и то же время. Другими словами, некорректно выполнить измерение температуры с помощью скважинной термометрии и через некоторое время (несколько недель, месяцев или лет) провести измерение с помощью статического зондирования;
2. изменением температурного режима мерзлых грунтов в пространстве, что требует выполнения измерений температуры грунта в непосредственной пространственной близости или в одном и том же месте. Другими словами, некорректно выполнить измерение температуры в разных геологических выработках и сравнивать результаты. Также, некорректно проводить статистический анализ получаемых данных на основе осреднения получаемых результатов, что очень характерно для обработки стандартных результатов статического зондирования, таких как лобовое сопротивление и боковое трение;
3. необходимостью предварительной тарировки измерительного оборудования (термокоса, зонд) непосредственно перед началом испытаний, которые обеспечат проверенные и

надежные результаты скважинной термометрии, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 25358–2012 [71]. Соответственно, наилучший способ — это получить исходные необработанные данные по измерению температуры мерзлого грунта (то, что называется английским термином «raw data»), что и было выполнено на опытной площадке.

С учетом вышесказанного, было принято решение создать условия сравнительного эксперимента так, чтобы они удовлетворяли требованию «при прочих равных условиях».

Для подтверждения точности и корректности выполняемых измерений температуры мерзлых грунтов с помощью статического зондирования была выбрана площадка исследований, где залегают мерзлые и талые грунты [9]. Помимо наличия мерзлых грунтов, выбор площадки был обусловлен возможностью проведения температурных замеров как статическим зондированием, так и скважинной термометрией.

Для получения результатов скважинной термометрии максимально удовлетворяющих требованиям вышеприведенных условий было решено использовать скважину, оставшуюся после выполнения статического зондирования. Для обустройства термометрической точки на основе статического зондирования использовалась сплошная пластиковая труба диаметром 32 мм. Труба герметизируется 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. Важно отметить, что пластиковая труба устанавливается в скважину от статического зондирования, что позволяет выполнить требование условия 2, а именно измерение температуры грунта на тех же глубинах и в том же самом месте.

Монтаж трубы и установка термокося производились в течение 5 минут (Рисунок 34, Рисунок 35, Рисунок 36) после завершения зондирования и смещения установки статического зондирования в сторону.



Рисунок 34 — Этапы установки обсадной трубы в термометрическую скважину, 1-я минута (фото автора)



Рисунок 35 — Этапы установки обсадной трубы в термометрическую скважину, 3-я минута (фото автора)



Рисунок 36 — Этапы установки обсадной трубы в термометрическую скважину, 5-я минута (фото автора)

Разница во времени между последним температурным замером и окончанием установки пластиковой трубы составила 30 минут. При этом технология обустройства термометрических скважин таким способом полностью соответствует требованиям ГОСТ 25358-2012 [71].

Для измерения температуры грунтов использовались термокосы производства GeoPrecision, Германия (Рисунок 37) [9, 44]. Конструкция термокосы позволяет производить замеры в скважинах очень малого диаметра, что повышает точность измерений. Диаметр

термодатчика в составе устройства составляет 10 мм. Точность замеров температуры составляет $0,1^{\circ}\text{C}$, что иллюстрирует график, взятый из технического паспорта на устройство (Рисунок 38). Разрешение датчиков, используемых в устройстве GeoPrecision, составляет $0,01^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 37 — Вид термокосы GeoPrecision [44]

Запись температурных данных осуществлялись сразу же после установки термокосы в обустроенную на месте выполнения статического зондирования скважину (скважина СРТ-32). Выстойка скважины, контролировалась путем замера температуры грунтов с интервалом 1 час. На основе полученных данных установлено, что стабилизация температурного режима в скважине наступила через 8 часов.

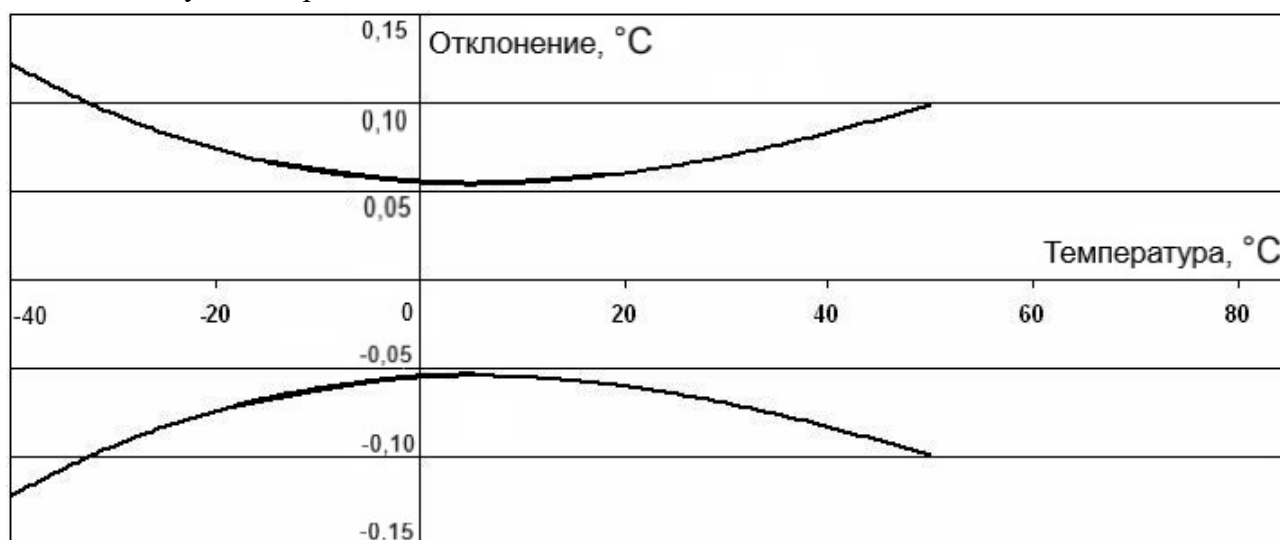


Рисунок 38 — Номограмма погрешности измерения температур устройством GeoPrecision [44]

Сбор данных логгером термокосы производился в течение 20 часов после установки термокосы в скважину. Процесс получения этих данных с помощью беспроводного устройства осуществлялся в конце периода записи, через 20 часов после установки термокосы в скважину (Рисунок 39).



Рисунок 39 — Сбор данных термометрии (фото автора)

Измерение температуры с помощью статического зондирования проводилось в соответствии с требованиями СП 25.13330.2012, Приложения Л [78]. Однако, в ходе испытаний была также опробована и верифицирована методика, разработанная автором, которая позволяет произвести экспресс-замер температуры, не дожидаясь полной стабилизации температуры зонда, другими словами, принятия зонда температуры окружающего грунтового массива.

3.4 Описание разрабатываемой методики замера температуры с помощью статического зондирования

Принято классифицировать два вида задавливания зонда — непрерывное и прерывистое [48, 86]. Непрерывное задавливание зонда в грунт происходит с постоянной скоростью, как правило, 2 см/с, а перерывы в погружении зонда осуществляются для наращивания штанг задавливающей колонны. Методика непрерывного задавливания зонда подробно описана в ГОСТ 19912-2012 [64]. 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 (релаксационные, диссипационные) [48].

С точки зрения теплового взаимодействия важно 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 был впервые описан И.Б. Рыжковым, О.Н. Исаевым и также Т. Lunne [48, 89, 94]. При погружении зонда в мерзлый грунт на границе системы «зонд – мерзлый грунт» происходит сложное теплофизическое взаимодействие. Если в твердомерзлых, как и в талых, грунтах зонд разогревается, то в пластичномерзлых грунтах температура зонда часто несколько понижалась. Данный необычный эффект был назван эффектом «псевдоаномального охлаждения зонда» [48]. В диссертации [33] предложена модель теплофизического взаимодействия системы «зонд – мерзлый грунт», которая дает свое объяснение «псевдоаномальному охлаждению зонда». В основу модели легло положение о наличии двух взаимно противоположных тепловых процессов, происходящих на границе системы «движущийся зонд — мерзлый грунт». Первый обусловлен потоком поглощаемого зондом тепла, образующегося в результате трения; второй — потоком отдаваемого зондом тепла, образующегося в результате понижения температуры плавления льда при высоких давлениях. В зависимости от соотношения этих потоков температура зонда может повышаться или понижаться.

Исходя из опыта автора, можно сделать вывод, что, разогрев в мерзлых грунтах существенно ниже, чем в талых. Этот эффект пока мало изучен, и требует накопления больших объемов материалов. Интенсивность разогрева зонда зависит от ряда факторов, таких как состояние грунта (мерзлое/талое), тип грунта, плотность грунта, скорости вдавливания зонда.

Существуют два критерия стабилизации температуры зонда.

Первый критерий приведен в СТО 36554501-049-2016, пункт 7.2.4 [80], и СП 25.13330.2012, Приложение Л, пункт Л.2. [78]. Критерий заключается в том, что зонд следует выстаивать в грунте до того момента, пока изменение температуры наконечника будет составлять менее 0,05°C за последние 5 минут замера. В этом случае считается, что наконечник зонда принимает температуру вмещающего грунта. В случаях зондирования высокотемпературных мерзлых грунтов, преимущественно песчаного состава такая стабилизация занимает длительное время и не позволяет проводить большое число замеров. Для ускорения температурных замеров была разработана экспресс-методика для оценки температуры грунта, которая основана на выполнении второго критерия.

Второй критерий стабилизации температуры использует обработанную температурную кривую. Обработка кривой происходит параллельно со считыванием данных температуры зонда во времени (Рисунок 40, фиолетовая кривая) и обновляется на экране каждую секунду (Рисунок 40, желтая кривая), где температура грунта оценивается по следующему уравнению:

$$T(t) = \frac{A}{t} + T_0, \quad (24)$$

где $T(t)$ — измеряемая температура, A — коэффициент пропорциональности, t — время, T_0 — естественная температура грунта.

Для этого выбирается интервал на измеренной температурной кривой (обычно последние 60 сек), для каждого интервала программа в автоматическом режиме находит неизвестные приведенного уравнения: коэффициент пропорциональности A и температуру T_0 . При условии, когда теплообмен между зондом и грунтом выходит на квазистационарный

режим и изменение температуры подчиняется вышеуказанному уравнению, желтая кривая на экране оператора статического зондирования принимает горизонтальный вид, а значения T_0 соответствует естественной температуре грунта.

Важно отметить, что разработанный алгоритм рассчитывается с той частотой, с которой ведется запись данных. В ходе испытаний мерзлых грунтов частота считывания датчиков зонда задается от 1 до 4 раз в секунду. Воспроизведение на экран рассчитанных с помощью уравнения значений температуры также производится мгновенно, что позволяет видеть оператору статического зондирования достигнуто ли необходимое условие или нет.

В ходе испытаний на исследуемой площадке выполнялось прерывистое задавливание с остановками для замера температуры грунта, как по экспресс-методике (Рисунок 40), так и по методике температурной стабилизации, приведенной в СТО 36554501-049-2016 [80].

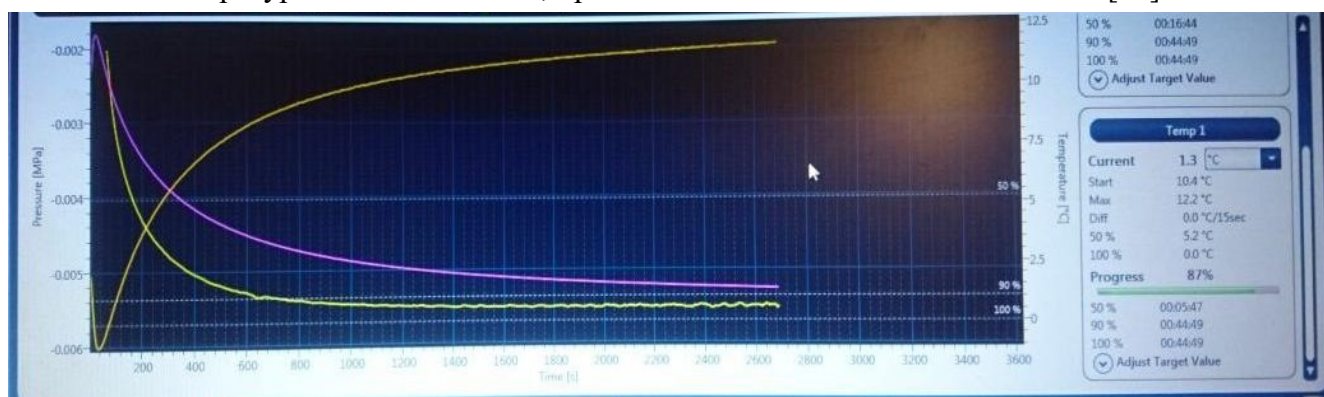


Рисунок 40 — Экран терминала сбора данных во время замера температуры в полевых условиях

В процессе выполнения статического зондирования было произведено 17 замеров температуры грунтов. В среднем, время температурной стабилизации зонда в мерзлом грунте составляет около 10 минут. При выполнении замера оператором отслеживаются стабилизация температуры, и контролируется выполнение критерия стабилизации температуры, как по методике СТО 36554501-049-2016 [80] (Рисунок 41, Рисунок 42):

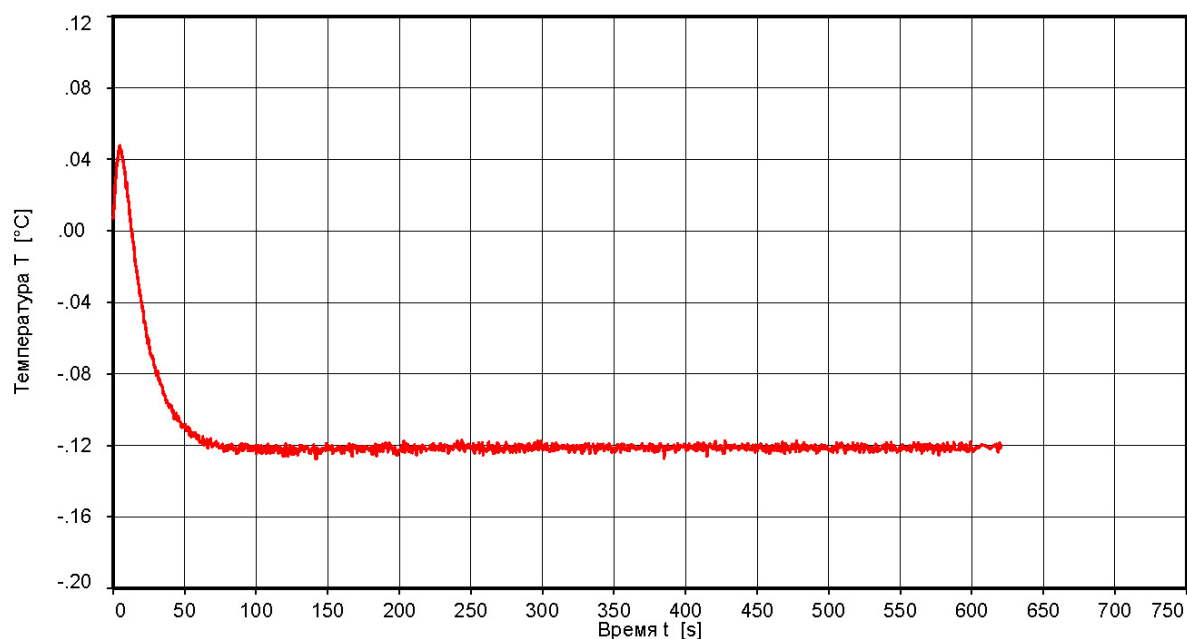


Рисунок 41 — Изменение температуры датчика зонда во времени

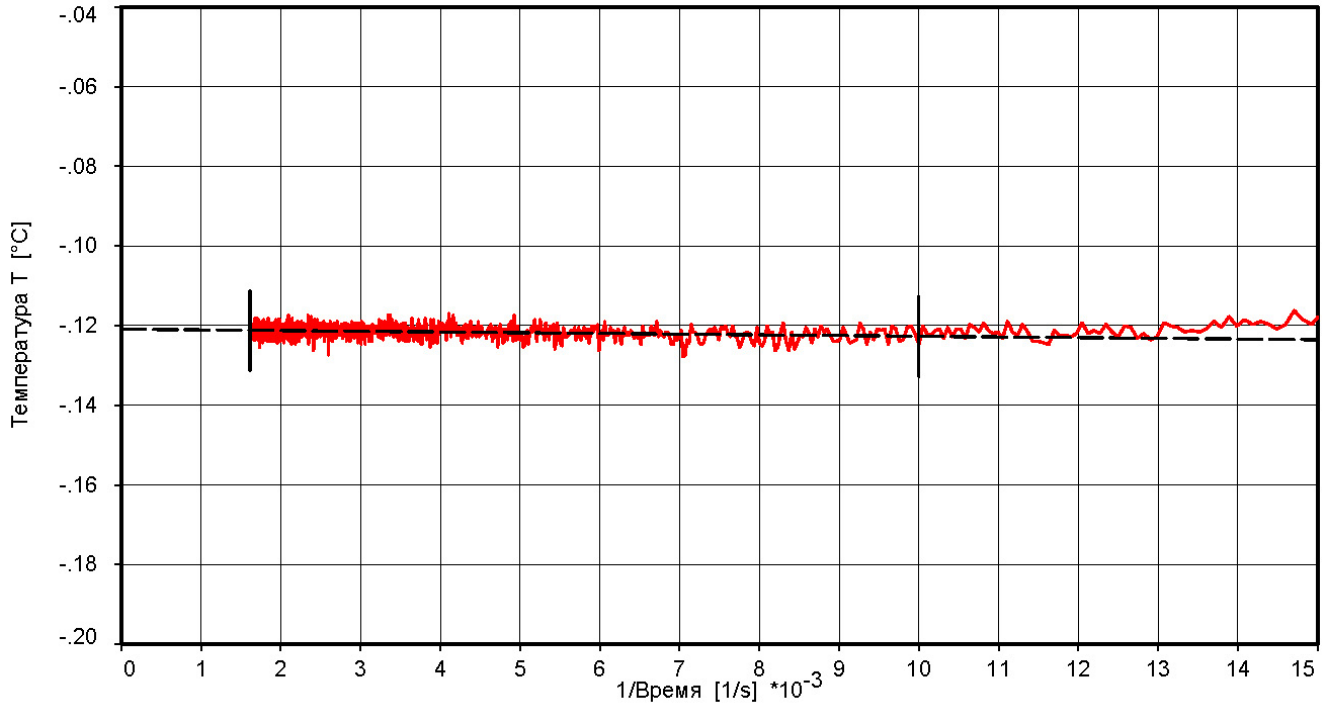


Рисунок 42 — Стационарный режим температуры грунта при замере зондом статического зондирования

Ниже приводится замер температуры по разработанной экспресс-методике (Рисунок 43, Рисунок 44), описанной выше.

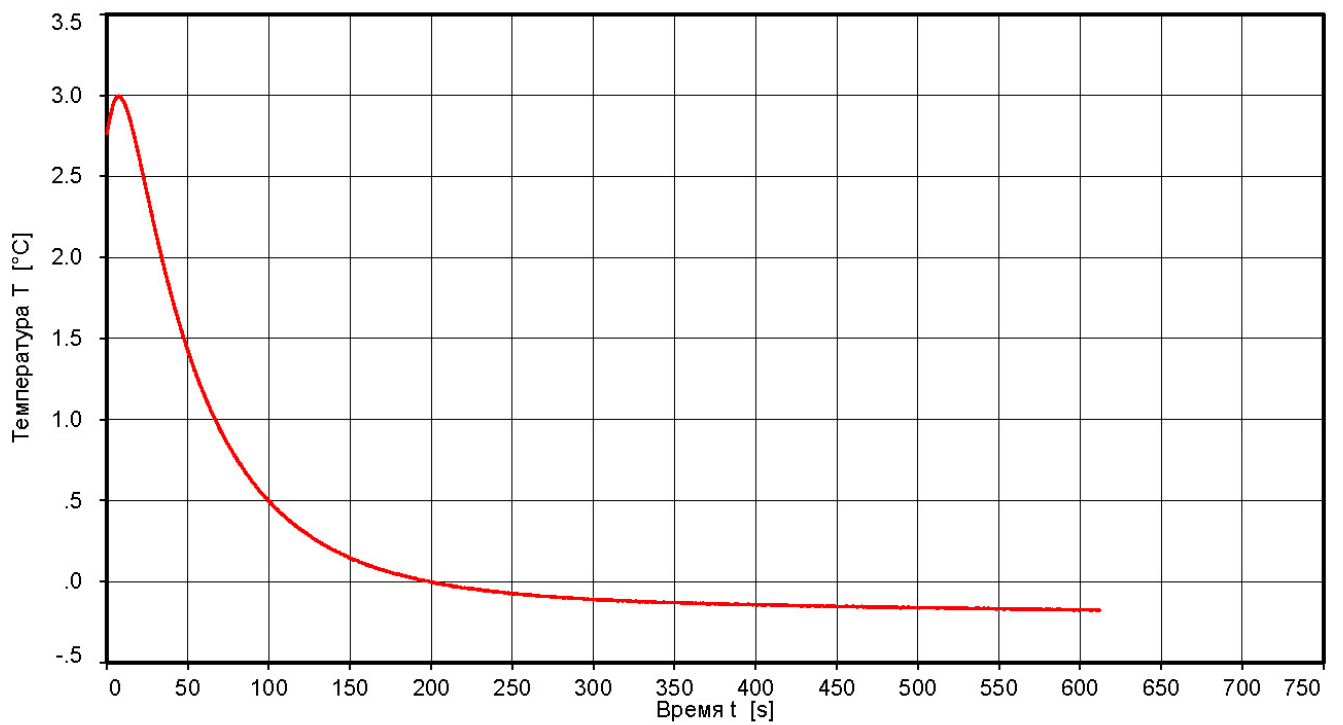


Рисунок 43 — График замера температуры в соответствии с разработанной методикой

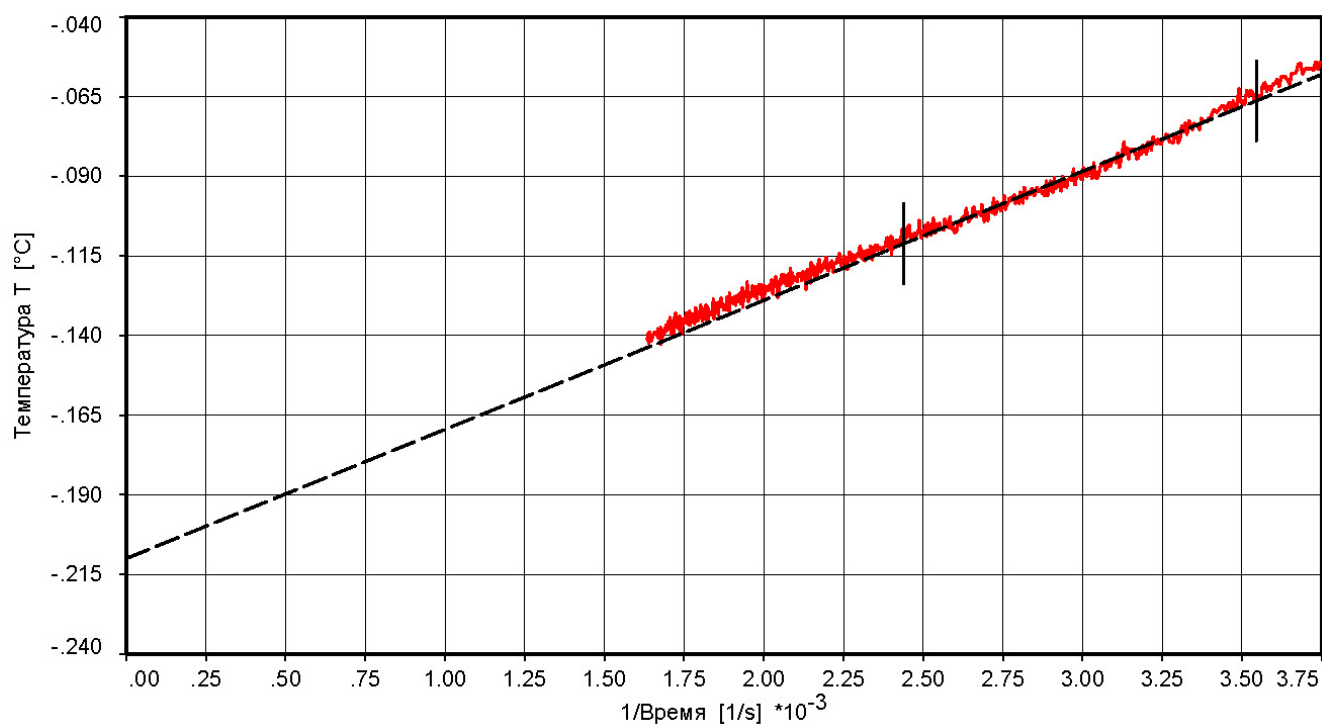


Рисунок 44 — Квазистационарный режим замера температуры грунта при замере зондом статического зондирования в соответствии с разработанной методикой

Заявленная точность замеров температуры с помощью зонда в соответствии с калибровочным сертификатом составляет $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, однако, разрешение температурного датчика составляет $0,01^{\circ}\text{C}$.

Результаты замеров температуры, полученные на опытной площадке (Таблица 2), подтверждают наличие толщи мерзлых грунтов в интервале от 2 до 8 м от поверхности. Замеры температуры грунтов выполнены с помощью зонда статического зондирования (столбец 2) и двумя термокосами в скважинах различного диаметра, скважина СРТ-32 — $\text{Ø}32$ мм (столбец 3); скважина ВН-90 — $\text{Ø}89$ мм (столбец 4). Скважина ВН-90 расположена в 3 м от точки статического зондирования СРТ-32 и была пробурена двумя месяцами ранее для температурного мониторинга. Температура мерзлых грунтов составила от $-0,08^{\circ}\text{C}$ до $-0,26^{\circ}\text{C}$.

Расхождение замеренных значений температуры с помощью статического зондирования и замеренных значений температуры с помощью двух термокос в двух скважинах (Столбцы 5 и 6) изменяется в пределах от $-0,19^{\circ}\text{C}$ до $+0,11^{\circ}\text{C}$ и в среднем составляет $-0,02^{\circ}\text{C}$.

В соответствии с п. 4.6, ГОСТ 25358-2012 [71], инструментальная погрешность приборов для полевых измерений температуры грунтов в диапазоне температур $\pm 3^{\circ}\text{C}$ не должна превышать $0,1^{\circ}\text{C}$, таким образом допустимая точность измерения температуры грунтов составляет $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$

Точность замеров температуры с помощью зонда составляет $0,05^{\circ}\text{C}$. Это означает, что истинное значение естественной температуры грунта T лежит в доверительном интервале от замеренного детектором значения $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$. Запись измеряемой температуры осуществляется с разрешением $0,01^{\circ}\text{C}$. Точность замеров температуры с помощью термокосы составляет $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Запись измеряемой температуры также осуществляется с разрешением $0,01^{\circ}\text{C}$.

Таблица 2 — Измеренная температура грунта в ходе сравнительных испытаний (составлено автором)

Глубина, м	Температура грунта, °С			Расхождения в замерах температуры грунта, °С	
	статическое зондирование (СРТ)	скважина СРТ-32	скважина ВН-90	Δ СРТ – Сква. СРТ-32	Δ СРТ – Сква. ВН-90
1	2	3	4	5	6
2,0	-0,25	-0,25	-0,10	0,00	-0,15
3,0	-0,23	-0,25	--	0,02	--
3,5	-0,21	-0,13	-0,24	-0,08	-0,01
4,0	-0,21	-0,12	--	-0,09	--
4,5	-0,10	-0,06	-0,12	-0,04	-0,02
5,0	-0,08	-0,18	--	+0,10	--
5,5	-0,10	-0,12	-0,25	+0,02	+0,11
6,0	-0,12	-0,07	--	-0,05	--
6,5	-0,22	--	--	--	--
7,0	-0,26	-0,12	--	-0,14	--
7,5	-0,12	--	-0,13	--	-0,03
8,0	0,12	0,19	--	-0,07	--
8,5	0,31	--	0,19	--	+0,08
9,0	0,61	0,50	--	+0,11	--
10,0	0,81	0,68	--	+0,13	--
11,0	1,04	1,06	--	-0,02	--

Анализ соотношения доверительных интервалов, получаемых данных по двум видам измерительных приборов – зонд и термокоса, показывает, что во всех полученных парах значений (зонд – термокоса), наблюдается взаимное пересечение доверительных интервалов. Однако разница в фактически замеренных величинах температуры дает разный характер пересечения этих интервалов. Также взаимное расположение измеренных значений температуры по отношению доверительных интервалов бывает двух типов.

Рассмотрим эти соотношения.

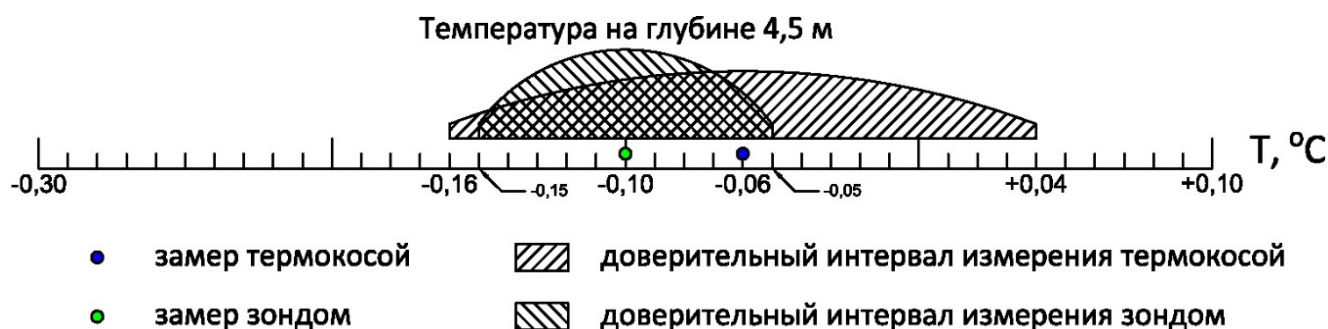


Рисунок 45 — Соотношение доверительных интервалов, случай типа А

В первом случае (тип А) значения температуры, измеренные зондом, находятся внутри зоны доверительного интервала значения температуры, измеренного термокосой (Рисунок 45). Выявлено 10 из 13 пар таких значений. Они приведены в Таблица 2 и помечены зеленым.

Другими словами, рассматриваемые значения, полученные с помощью статического зондирования, попадают в доверительный интервал значений, замеренных термокосой. В

данном случае можно говорить о полном совпадении измеренных значений с помощью различных методов.

Во втором случае (тип Б) значения температуры, измеренные зондом и термокосой, находятся за пределами зоны пересечения соответствующих доверительных интервалов (Рисунок 46). Тем не менее, во всех полученных парах значений температуры существует пересечение соответствующих доверительных интервалов. Таких пар замеренных величин температуры выявлено 3 из 13. Они приведены в Таблица 2 и отмечены желтым.

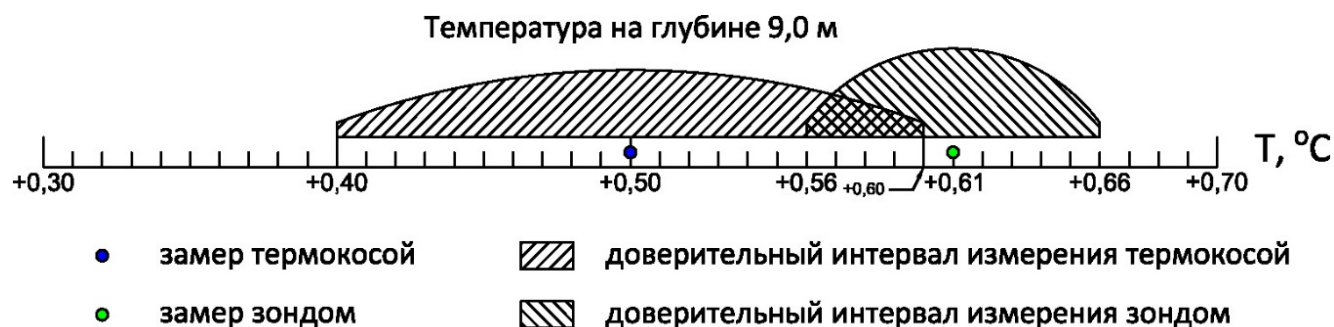


Рисунок 46 — Соотношение доверительных интервалов, случай типа Б

Значения, выделенные желтым, имеют немного большую разницу, но пересечение доверительных интервалов позволяет говорить о том, что истинное значение естественной температуры грунта T лежит в зоне пересечения доверительных интервалов.

Пересечение доверительных интервалов значений, полученных двумя независимыми измерительными приборами, позволяет говорить о том, что эти значения, как в паре, так и по отдельности соответствуют необходимой точности замера температуры грунтов, предъявляемой действующими нормативами.

Анализ значений температуры, полученных двумя разными датчиками (Рисунок 47, Рисунок 48), позволяет использовать оба источника данных о температуре для определения фазового состояния грунта (мерзлый или талый) на основании полученных данных по температуре грунта.

Видно, что все полученные данные отражают реальную картину распределения температуры грунтов в пределах опытной площадки, что подтверждается дополнительной термометрической скважиной ВН-90, диаметром 89 мм, пробуренной и обустроенной в соответствии с действующими нормативами. Важно отметить, что разница измеренных значений температуры в скважине, полученной статическим зондированием, и пробуренной в трех метрах скважине не превосходит $0,2^{\circ}\text{C}$.

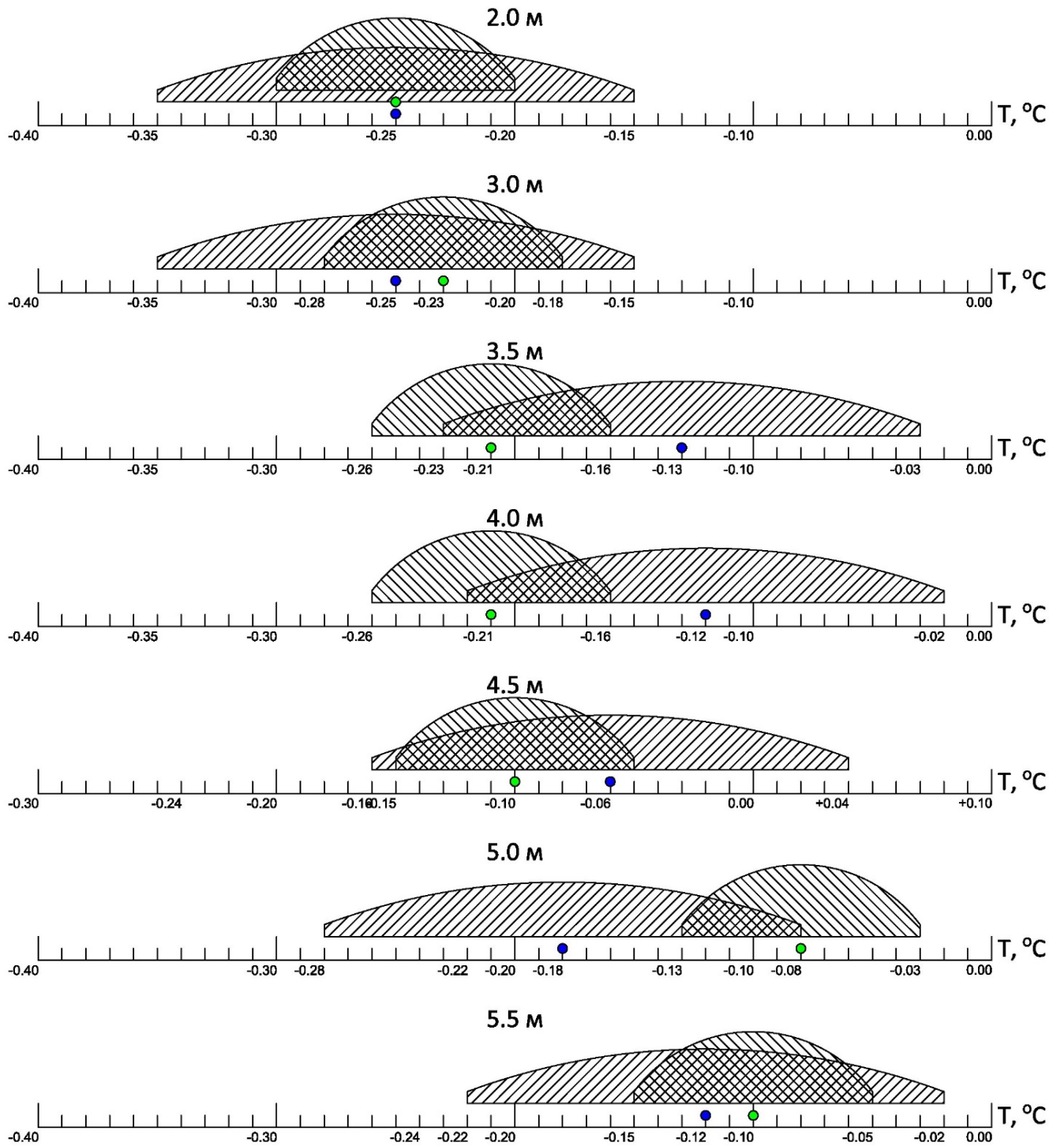


Рисунок 47 — Графики пересечения доверительных интервалов замеров температуры на глубине 2,0-5,5 м

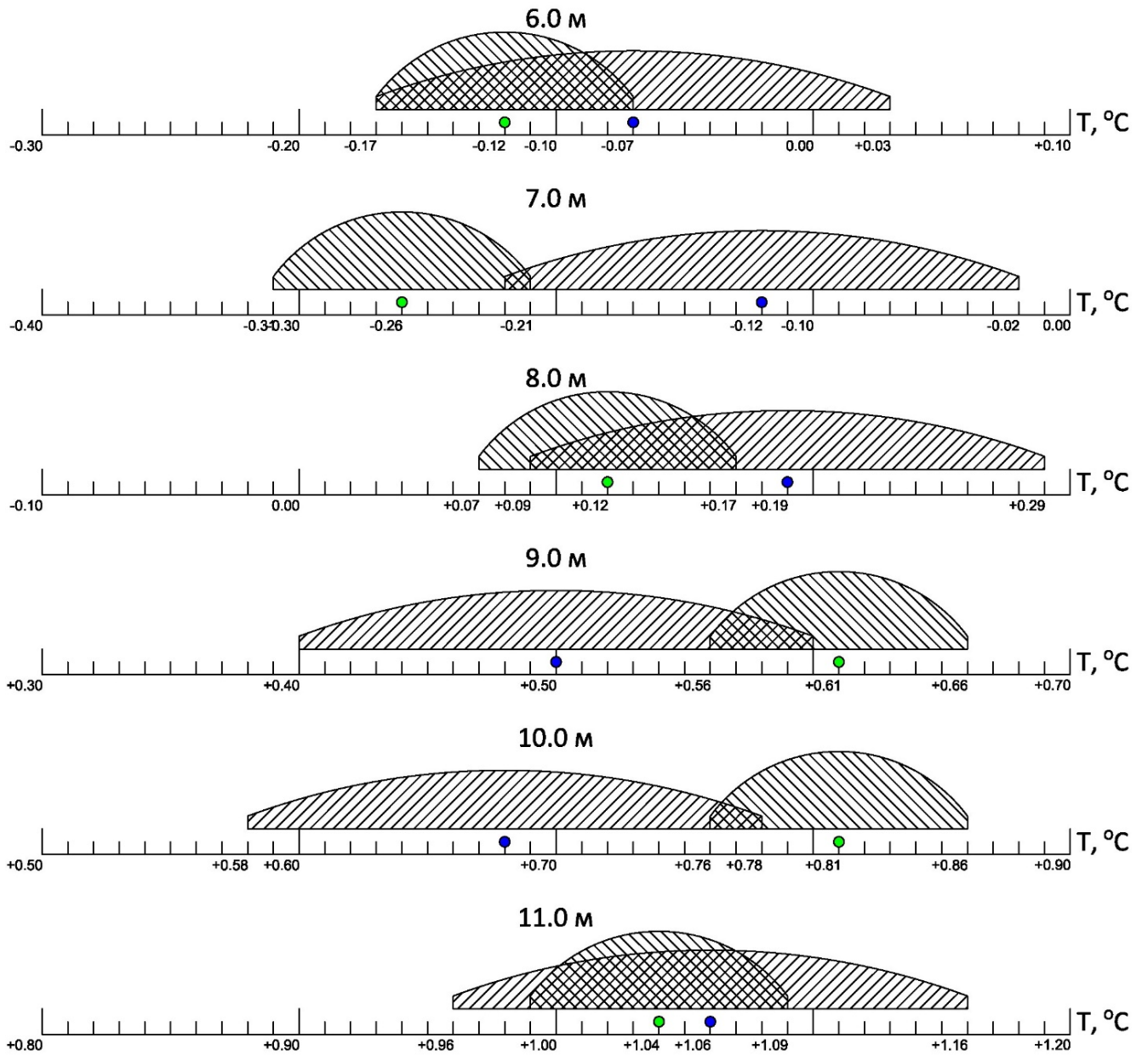


Рисунок 48 — Графики пересечения доверительных интервалов замеров температуры на глубине 6,0-11,0 м

Выводы

1. Использование статического зондирования для измерения температуры может служить первичным источником информации о температурном состоянии массива, сложенного многолетнемерзлыми грунтами. После выполнения статического зондирования в точке проведения испытаний при помощи обсадной трубы вручную могут быть оборудованы пункты для последующих режимных наблюдений за температурой многолетнемерзлых грунтов, соответствующие требованиям ГОСТ о методах полевого измерения температуры.
2. Установлена корреляция замеров, выполненных при помощи статического зондирования и замеров, выполненных двумя термодатчиками в скважинах различного диаметра. На основании сравнения не обнаружено противоречия и сильных расхождений в температурных замерах с помощью статического зондирования и скважинной термометрии.
3. Проведенный анализ показал, что измерение температуры с помощью зонда для статического зондирования показывает более высокую точность по сравнению с замерами, выполненными термодатчиком, что обусловлено в первую очередь более высокой точностью температурного датчика в зонде по сравнению с датчиками термодатчика, используемым в проведенных исследованиях, а также прямым контактом термодатчика зонда с грунтом, в отличие от замеров термодатчиком, где происходит измерение температуры воздуха, заполняющего скважину.
4. Применение разработанной автором экспресс-методики показало отличную совпадение между значениями температуры, полученных с помощью измерения термодатчиками и статическим зондированием. Это дает эмпирическое и научное обоснование для использования данной методики в практических исследованиях.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕРЗЛОГО ГРУНТА МЕТОДОМ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

4.1 Теоретическое обоснование применения уравнений длительной прочности к измеряемым значениям лобового сопротивления и бокового трения при релаксационном испытании

Для решения задач, связанных с проектированием оснований сооружений и прогноза устойчивости оснований, устроенных на мерзлых грунтах, с точки зрения реологии, используются характеристики длительного разрушения, включая понятие длительной прочности [3, 26, 37, 51, 62]. Под длительной прочностью подразумевается напряжение, до превышения которого разрушения не наступает, в то время как при его превышении развивается прогрессирующая ползучесть, приводящая к разрушению. Для мерзлых грунтов по данным С.С. Вялова [15] длительная прочность в 5—15 раз меньше сопротивления быстрому разрушению, или условно-мгновенной прочности. Для проектирования фундаментов и оснований на мерзлых грунтах одними из ключевых параметров длительной прочности мерзлого грунта являются длительная прочность на сжатие (в частности, длительное сопротивление основания сваи и др.) и длительная прочность на сдвиг по поверхности смерзания.

Для оценки длительной прочности существуют два подхода. В первом измеряется деформация грунта от приложенной нагрузки для описания процесса ползучести, или изменения деформации во времени. Во втором измеряется напряжение в грунте, вызванное приложенной нагрузкой, для описания процесса релаксации, или изменения напряжения во времени [15, 59]. В некоторых методах два подхода комбинируются. Рассмотрим более подробно второй подход.

Релаксацией напряжения называют уменьшение во времени напряжения в грунтах, необходимого для поддержания постоянной деформации [15]. Релаксация является следствием перераспределения упругой и пластической деформаций. Время релаксации T_r является одним из наиболее важных реологических параметров (Рисунок 49).

Все физические тела обладают одновременно упругими и вязкими свойствами. Только проявление этих свойств, а соответственно характер поведения тела зависит от времени приложения нагрузки или от времени наблюдения, точнее, от соотношения этого времени и времени релаксации.

При условии, что время наблюдения существенно меньше времени релаксации, происходит проявление упругих свойств – тело ведет себя как твердое тело Гука. Если же время наблюдения значительно больше времени релаксации, то происходит проявление вязких свойств и у тела будут ярко выражены свойства ньютоновой жидкости. Установлено, что у горных пород, формирующих земную кору, время релаксации изменяется тысячелетиями (например, у известняка 10^{10} с), у стекла — столетиями (10^9 с), у льда — сотнями секунд, у воды — 10^{-11} с. Соответственно если к воде приложить силу, действующую в течение времени, меньшем 10^{-11} с, то у нее будут проявляться упругие свойства. И, наоборот, горные породы под

воздействием давления способны за геологические периоды времени развивать вязкое течение, проявление которого достоверно установлено в геологии. Наиболее удобным, с точки зрения восприятия человеком, материалом, сочетающим в себе упругие и вязкие свойства, является лед.

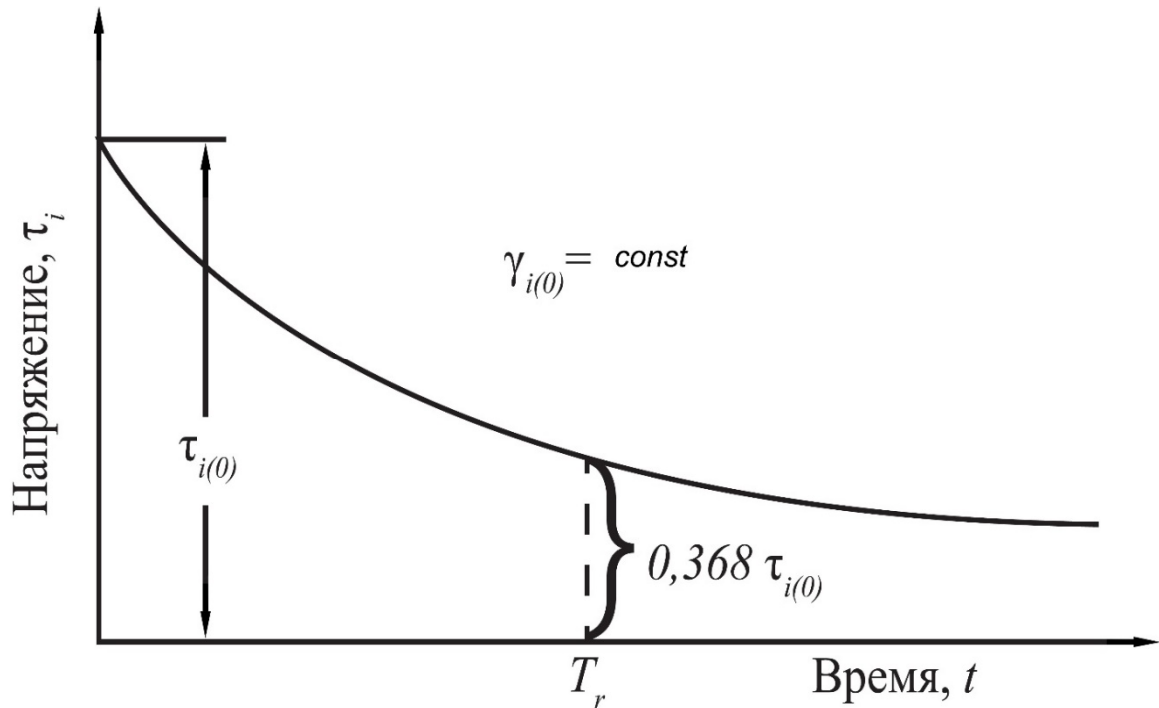


Рисунок 49 — Кривая релаксации напряжения [15]

Время релаксации льда составляет 10^2 – 10^3 с, и в пределах этого времени лед ведет себя как упругое тело, например, он хрупко разрушается при быстром ударе. При большем же времени воздействия нагрузки лед течет подобно вязкой жидкости, как это происходит в ледниках. Аналогичное поведение — хрупкое разрушение при быстром приложении нагрузки и вязкое течение при длительном воздействии нагрузки — отчетливо наблюдается у мерзлых грунтов [15].

При этом следует учитывать, что грунт начинает течь не при любой нагрузке, а только после того, как напряжение превысит некоторый предел, который зависит от строения грунта и определяется модулем деформации. Это означает, что к мерзлым грунтам в большей степени применима не теория идеально вязкой ньютоновой жидкости, а теория вязкопластического течения Бингама. Для мерзлых грунтов, в составе которых присутствует лед, справедливо проводить испытания на измерение релаксации напряжений в интервале времени большем времени релаксации льда, т.е. 10^2 – 10^3 с. Таким образом, при приложении нагрузки на мерзлые грунты более чем несколько минут грунт ведет себя как реологическое тело, и происходит релаксация напряжений, а прикладываемая нагрузка должна находиться в интервале между величиной мгновенной прочности, при которой произойдет разрушение грунта, и величиной предела длительной прочности.

Существует схожий по отношению ко времени релаксации параметр, называемый «временем последействия» — T_p . Время последействия выводится из уравнения последействия Кельвина, описанное С.С. Вяловым [13]. Время последействия равно отношению коэффициента

вязкости к модулю упругости сдвига и описывает процесс ползучести, другими словами, изменения деформации во времени.

Важно отметить, что время релаксации не равно времени последействия. Время релаксации — это характеристика изменения напряжения во времени (релаксация), а время последействия — это характеристика изменения деформации во времени (ползучесть). В свою очередь время последействия можно получить из опытов, где задается постоянная нагрузка (или напряжение), а время релаксации — из опытов с заданной постоянной деформацией. Поскольку процесс релаксации напряжений происходит гораздо быстрее процесса ползучести (время релаксации $T_r \ll$ времени последействия T_p), это позволяет существенно снизить время испытания грунта в режиме релаксации напряжения. В своих работах это отмечено С.С. Вяловым, Л.Т. Роман, А.Н. Труфановым и др. [15, 46, 55].

В данной работе автор не рассматривает процесс ползучести, поскольку статическое зондирование не измеряет деформацию грунта.

При протекании процесса релаксации напряжений происходит нарастание пластической деформации за счет уменьшения доли упругой при неизменной величине общей суммарной деформации. Одним из первых аналитическое выражение процесса релаксации дал Максвелл, который исходил из предположения о существовании прямо пропорциональной зависимости между скоростью убывания напряжения с течением времени и величинами действующих напряжений. Однако, экспериментально эта теория не подтвердилась [22]. Попытки дать аналитическое выражение, отображающее весь ход релаксационной кривой, не увенчались успехом.

В металловедении более плодотворными оказались попытки дать аналитическое выражение для участков I и II кривой релаксации в отдельности (Рисунок 50). При этом ряд исследователей берет за основу такого деления представление о различных механизмах релаксации на I и II участках.

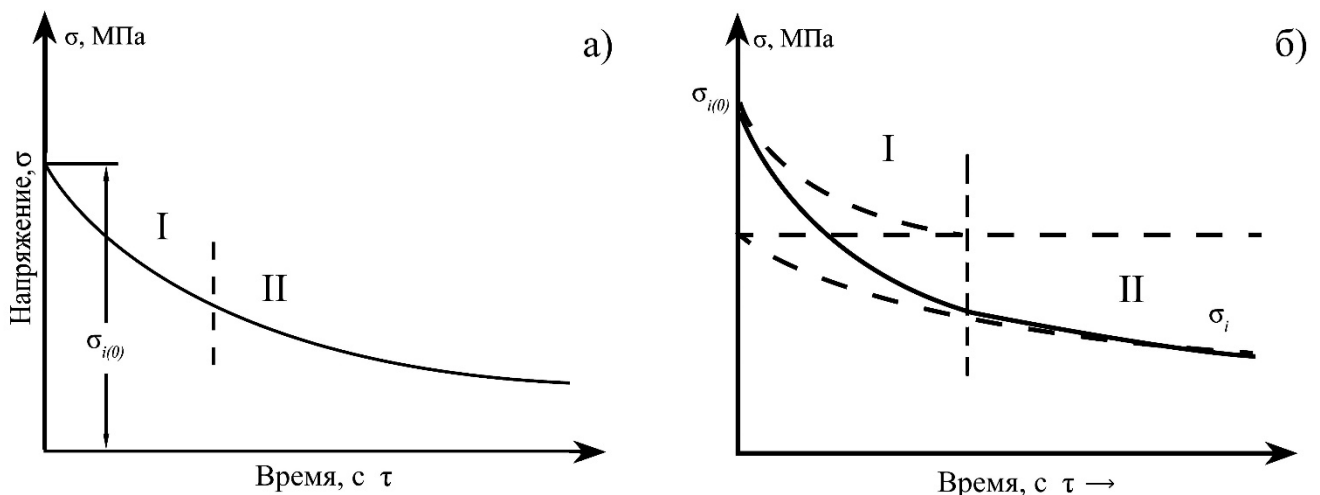


Рисунок 50 — Схема кривой релаксации напряжений (а) и ее интерпретация (б) [22]

Предполагают, что участок I кривой релаксации определяется действием процессов, протекающих на границах зерен поликристаллического металла и представляющих собой диффузионные явления. участок II кривой релаксации определяется действием процессов, протекающих в теле зерна и представляющих собой сдвиговые явления, имеющие, однако,

некоторые отличительные особенности по сравнению с обычными сдвиговыми процессами при пластической деформации. По-видимому, более правильным является рассмотрение релаксации напряжений как результат наложения обоих процессов. С.В. Грачев с соавт. [22] отмечают, что пока неизвестно, имеют ли оба периода релаксации разный или одинаковый физический смысл.

Обобщая вышеизложенные теоретические основы, было решено использовать данный подход для определения длительной прочности мерзлого грунта на сжатие и длительной прочности мерзлого грунта сдвигу по поверхности смерзания с помощью метода статического зондирования.

4.2 Особенности полевого испытания мерзлых грунтов статическим зондированием

В практике статического зондирования грунтов существуют 2 подхода при выполнении испытаний, отличающихся способом задавливания зонда.

В первом проводится непрерывное задавливание зонда в грунт с постоянной скоростью, равной 2 см/сек и принятой как стандарт во всем мире. Подробно методика задавливания описана в отечественных (ГОСТ 19912-2012 [64], ГОСТ Р ИСО 22476-1-2017 [69], СН 448–72 [76]), зарубежных (ASTM D 5778 [105], BS 5930:1999 [106]) и международных стандартах (ISO 22476-1:2012 [107], ISO 22476-12:2009 [111]).

Во втором подходе проводится прерывистое задавливание зонда в грунт. Зонд также погружается в грунт с постоянной скоростью, однако перерывы осуществляются на заранее заданной глубине, где выполняется испытание грунтов зондированием по специальным методикам. В перерывах задавливания давление масла не сбрасывается для поддержания наконечника зонда строго на постоянной глубине. Каждый перерыв соответствует отдельному испытанию на заданной глубине, где осуществляется запись данных во времени, таких как лобовое сопротивление и боковое трение, а также других дополнительных датчиков зонда, измеряющих поровое давление, температуру и др.

Испытание грунтов методом статического зондирования со стабилизацией включает 2 этапа. Движение зонда до намеченной глубины осуществляется с постоянной скоростью 0,5–1 см/с. При достижении намеченной глубины движение зонда останавливается. При этом нагрузка на зонд не снимается.

После завершения движения зонда оборудование автоматически переводится в режим испытания на релаксацию напряжений. Ведется запись показаний датчиков лобового сопротивления, трения грунта по боковой поверхности, температуры. Замер релаксации напряжений таким способом ведется непрерывно с частотой 2-4 считывания в секунду.

Согласно п. 3.7 РСН-33-70 [75] испытание грунтов в режиме релаксации напряжения должно продолжаться до момента, когда будет выполнено условие неизменности показаний датчиков лобового сопротивления и трения по боковой поверхности в течение 2 минут. Однако в настоящее время точность записи показаний и частота опроса датчиков выросли на несколько порядков, поэтому следует варьировать время проведения испытания в зависимости от вида грунта, ориентируясь на фактические данные, передаваемые зондом. Как описывалось выше, для льда время проявления реологических свойств составляет 10^2 – 10^3 секунд, в свою очередь

для минерального скелета грунта эта величина больше на несколько порядков, справедливо установить время проведения испытания в интервале времени сопоставимым с сотнями секунд, т.е. первые десятки минут. Ниже приведено описание обработки данных релаксации напряжения и критерии окончания теста на релаксацию напряжения непосредственно в поле. Для оператора установки видно, что если показания датчиков существенно не меняются на протяжении последних 2 и более минут, а также наступила стабилизация температуры зонда, то испытание можно приостанавливать и продолжать внедрение зонда в грунт до следующей намеченной глубины.

В соответствии с Приложением Л СП 25.13330.2012 после завершения измерений релаксации напряжения в грунте следует продолжать вдавливание без снятия нагрузки с зонда, другими словами, перехват следующей штанги осуществляется в момент нахождения зонда уже ниже глубины испытания на релаксацию напряжения. При этом глубина, на которую задавливается зонд после завершения релаксационного испытания, должна составлять не менее 10 см [48].

Также при проведении замеров температуры с помощью зонда необходимо зафиксировать стабильную отрицательную температуру датчика. В этом случае считается выполненным условие вмерзания зонда в грунт и представляется возможным замерить величину сдвига после смерзания муфты зонда с грунтом.

Однако в литературе можно встретить описание применимости статического зондирования только для пластичномерзлых грунтов, как обладающих сжимаемостью. В процессе многочисленных полевых испытаний ММГ методом статического зондирования неоднократно установлено, что зонд проникает через песчаные и мерзлые грунты сезонно-мерзлого слоя, где температура грунта была ниже -10°C , не встречая критического сопротивления вдавливанию. То же отмечается при проведении полевых испытаний сезонно-мерзлых грунтов в районах, где ММГ отсутствуют. В ходе сбора полевых материалов было выполнено испытание статическим зондированием на п-ове Гыданский, где на глубину до 9 м выполнено статическое зондирование естественной мерзлой толщи, сложенной незасоленными песками с температурой -6°C .

4.3 Обработка данных статического зондирования со стабилизацией

Базовым принципом обработки полученных данных, является утверждение о том, что геотехническая задача, решаемая методикой измерения релаксации напряжений в грунте, это оценка долговечности грунтов, которые служат основанием сооружения. Долговечность или длительная прочность — это сопротивляемость материала разрушению при длительном воздействии нагрузки. Прочность мерзлых грунтов во времени уменьшается в результате отсутствия предела длительной прочности у льда, являющегося постоянным и важным компонентом мерзлого грунта. Так установлено, что длительная прочность мерзлого грунта составляет в 2–15 раз меньшую величину [15], чем мгновенная прочность этого же грунта.

В работах С.С. Вялова [13, 15] предлагается использовать динамометрический прибор для проведения испытаний грунтов на длительную прочность. Конструкция прибора

предусматривает передачу нагрузки на образец грунта через динамометр с фиксацией его положения. Таким образом, достигается развитие деформации ползучести в образце, в результате чего происходит падение напряжения в динамометре, другими словами, релаксация напряжений в образце грунта, которую можно физически измерить. Принципиальная схема динамометрического метода реализована в релаксационном испытании грунта методом статического зондирования со стабилизацией. В процессе движения зонда грунту сообщается нагрузка, превышающая величину мгновенной прочности, но при остановке движения зонд фиксируется и ведется запись релаксации напряжений. Запись значений производится до момента, когда наступит стабилизация величины считываемых параметров. После чего полученные данные обрабатываются отдельно по датчикам лобового сопротивления и трения грунта по боковой поверхности с применением уравнений длительной прочности, основанных на различных ядрах релаксации: логарифмическом, степенном и дробно-линейном. Таким образом, получают индивидуальные значения длительной прочности грунта. Для данных, полученных с помощью датчика лобового сопротивления — это длительная прочность грунта на сжатие, а для данных, полученных с помощью датчика трения грунта по боковой поверхности — это величина длительной прочности на сдвиг. При построении графиков релаксации напряжения и обработки их перечисленными функциями устанавливается, какая из них наиболее точно описывает характер релаксации.

Далее рассмотрим применяемые уравнения длительной прочности.

Логарифмическое уравнение длительной прочности:

$$\tau = \frac{\beta}{\ln \frac{t_p+1}{T}}, \quad (25)$$

где τ — измеряемое напряжение, (лобовое сопротивление или боковое трение в МПа); t_p — время замера, с; β , T — коэффициенты, зависящие от характера релаксации напряжения.

Степенное уравнение длительной прочности:

$$\tau = \left(\frac{t_p+1}{T} \right)^{-\alpha}, \quad (26)$$

где τ — измеряемое напряжение, (лобовое сопротивление или боковое трение в МПа); t_p — время замера, с; α , T — коэффициенты, зависящие от характера релаксации напряжения.

Дробно-линейное уравнение длительной прочности:

$$t_p^\alpha = \left(\frac{T}{\delta} \right)^\alpha \cdot \frac{\tau_0 - \tau}{\tau - \tau_\infty}, \quad (27)$$

где τ — измеряемое напряжение, (лобовое сопротивление или боковое трение в МПа); τ_0 — начальное напряжение при $t = 0$, с; τ_∞ — предел длительной прочности при $t = \infty$, с; t_p^α — время замера, с; $\left(\frac{T}{\delta} \right)^\alpha$ — соотношение, зависящее от характера релаксации напряжения.

Применение обработки полученных в полевых условиях кривых релаксации напряжений с помощью описанных уравнений позволяет получить значения длительной прочности грунта на заданной глубине. Обоснованность применения этих уравнений подтверждается работами С.С. Вялова [13, 15] при испытании грунтов динамометрическим методом. В связи с этим было принято решение применить все 3, описанные выше уравнения длительной прочности, а не выбирать наилучшее из них.

Следует отметить, что каждое уравнение по-своему описывает механизм снижения прочности с течением времени. Например, для степенной функции предел длительной прочности равен нулю, для любых грунтов, что описывает поведение идеально вязкой Ньютоновой жидкости. В свою очередь, дробно-линейная функция использует значение предела длительной прочности τ_{∞} , отличное от нуля и рассчитываемое по специальной формуле. Эта функция характеризует грунт как тело со свойствами вязкопластического течения Бингама, имеющего предельно длительную прочность, значение которой отлично от нуля.

Далее рассмотрим обработку данных замеров релаксации напряжения. Как описывалось ранее, в расчет принимаются результаты измерения релаксации напряжения на каждой заданной глубине и обрабатываются с применением трех уравнений длительной прочности.

Обработка логарифмическим уравнением длительной прочности.

Уравнение (25) преобразовывается в виде линейной функции $y = kx + b$:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\beta} \cdot \ln(t_p + 1) - \frac{1}{\beta} \cdot \ln T, \quad (28)$$

где $y = \frac{1}{\tau}$; $x = \ln(t_p + 1)$; $k = \frac{1}{\beta}$; $b = -\frac{1}{\beta} \cdot \ln T$.

Рисунок 51 иллюстрирует метод обработки линеаризованных данных по лобовому сопротивлению зонда в процессе испытания со стабилизацией. Величина достоверности линейной аппроксимации данных в этом случае составляет 0,997.

На основе полученных коэффициентов $k=0,0125$ и $b=0,025$ выводится уравнение длительной прочности на сжатие:

$$\sigma_c(t) = \frac{80}{\ln_{0,139} \frac{t_p+1}{0,139}},$$

где σ_c — прочность грунта на сжатие.

Линеаризованный график лобового сопротивления

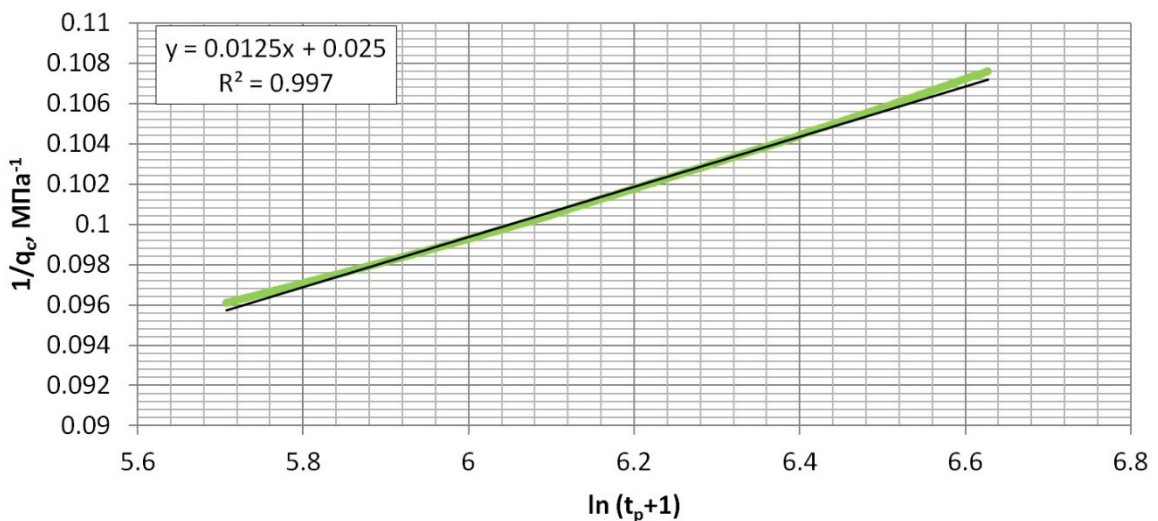


Рисунок 51 — Пример обработки данных лобового сопротивления логарифмической функцией

Аналогично обрабатываются данные по сопротивлению зонда вдоль боковой поверхности в процессе стабилизации.

Рисунок 52 иллюстрирует пример обработки данных. Величина достоверности линейной аппроксимации данных в этом случае составляет 0,989.

Линеаризованный график сопротивления вдоль боковой поверхности

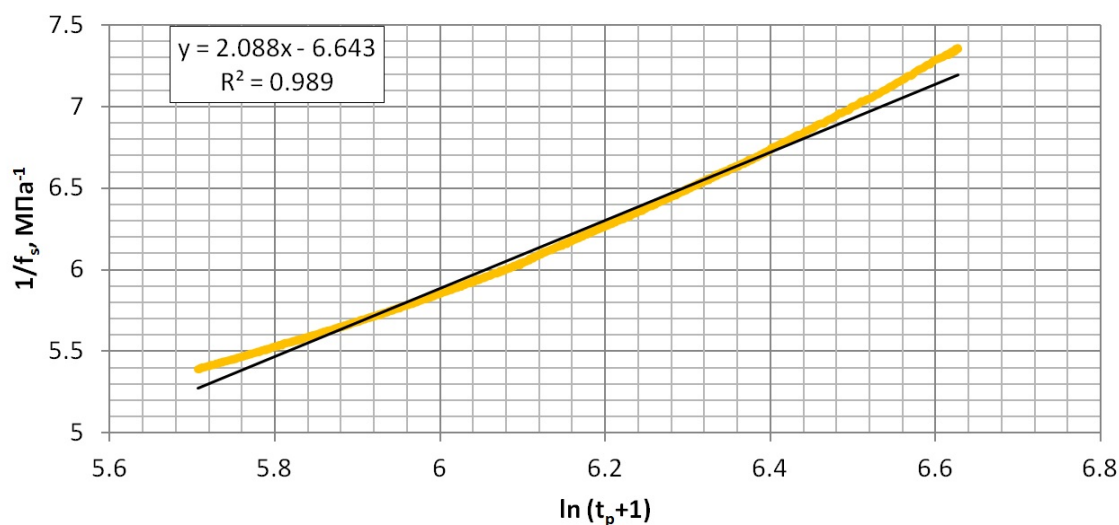


Рисунок 52 — Пример обработки данных сопротивления вдоль боковой поверхности логарифмической функцией

На основе полученных коэффициентов $k=2,088$ и $b=6,643$ выводится уравнение длительной прочности на сдвиг:

$$\sigma_s(t) = \frac{0,479}{\ln \frac{t_p+1}{24,069}},$$

где: σ_s — прочность грунта на сдвиг.

Ниже приводится таблица значений коэффициентов k и b , также значения критерия достоверности линейной аппроксимации R^2 для логарифмического уравнения (Таблица 3).

Обработка степенным уравнением длительной прочности.

Уравнение (26) преобразовывается в виде линейной функции $y = kx + b$:

$$\ln \tau = \alpha \cdot \ln(t_p + 1) - \alpha \cdot \ln T, \quad (29)$$

где $y = \ln \tau$; $x = \ln(t_p + 1)$; $k = \alpha$; $b = -\alpha \cdot \ln T$.

Рисунок 53 иллюстрирует пример обработки линеаризованных данных по лобовому сопротивлению зонда в процессе испытания со стабилизацией. Величина достоверности линейной аппроксимации данных в этом случае составляет 0,9967.

Линеаризованный график лобового сопротивления

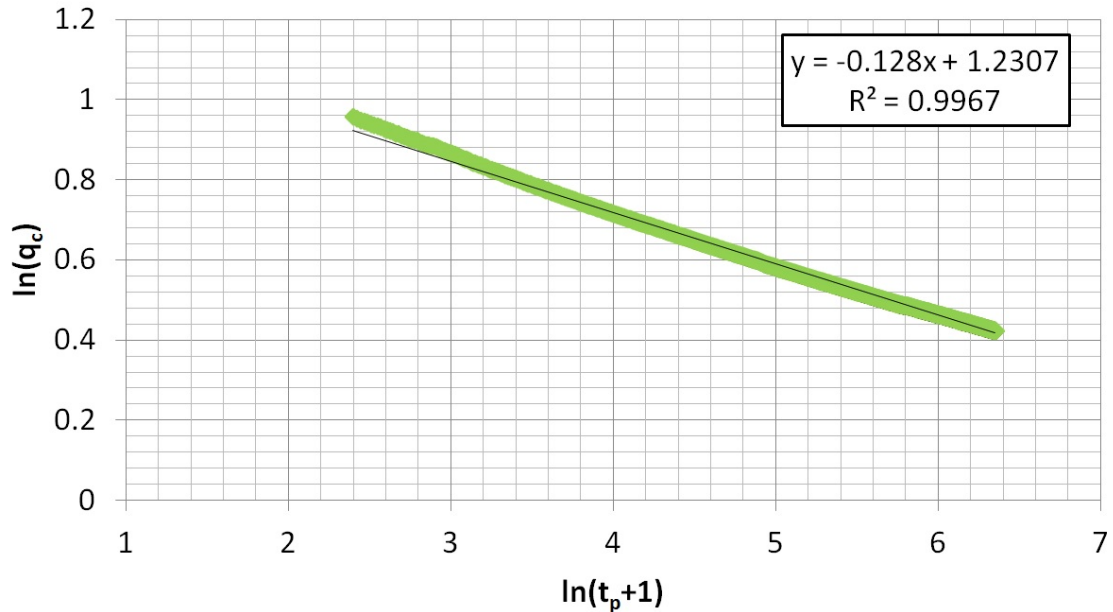


Рисунок 53 — Пример обработки данных лобового сопротивления степенной функцией

На основе полученных коэффициентов $k = -0,128$ и $b = 1,2307$ выводится уравнение длительной прочности на сжатие:

$$\ln \sigma_c(t) = -0,128 \cdot \ln(t_p + 1) - 1,2307$$

и преобразовывается в степенное уравнение 2:

$$\sigma_c(t) = \left(\frac{t_p}{14985,58} \right)^{-0,128},$$

где σ_c – прочность грунта на сжатие.

Аналогично обрабатываются данные по сопротивлению зонда вдоль боковой поверхности в процессе стабилизации.

Рисунок 54 иллюстрирует пример обработки данных. Величина достоверности линейной аппроксимации данных в этом случае составляет 0,9772.

На основе полученных коэффициентов $k = -0,511$ и $b = -1,1393$ выводится уравнение длительной прочности на сдвиг:

$$\ln \sigma_s(t) = -0,511 \cdot \ln(t_p + 1) - 1,1393$$

и преобразовывается в степенное уравнение:

$$\sigma_s(t) = \left(\frac{t_p}{0,1076} \right)^{-0,511},$$

где σ_s — прочность грунта на сдвиг.

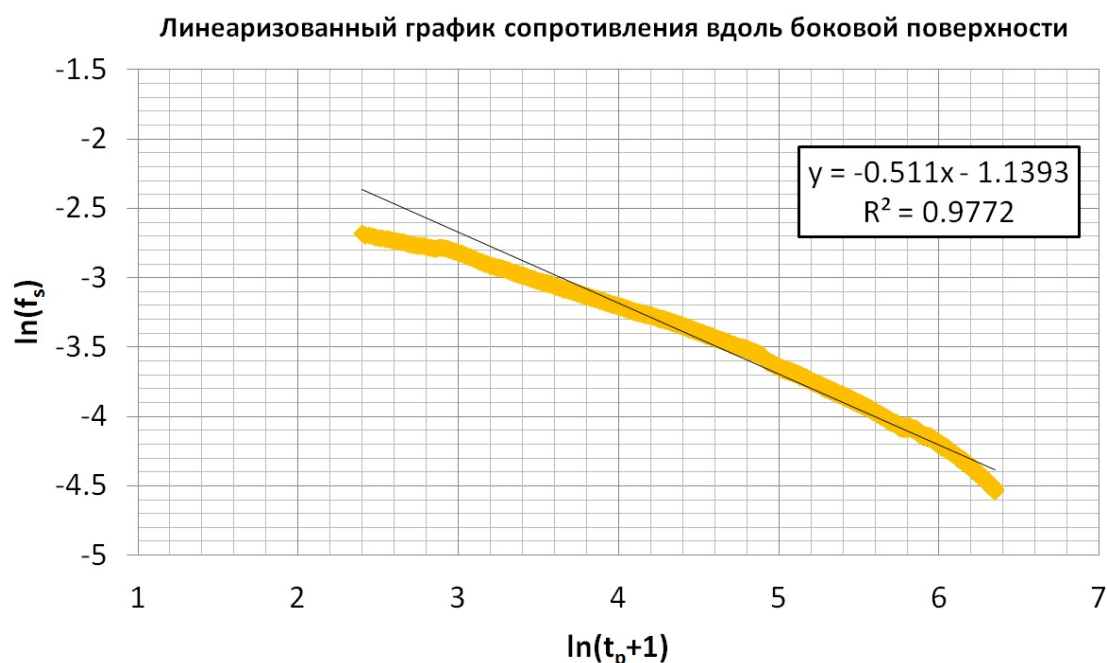


Рисунок 54 — Пример обработки данных сопротивления вдоль боковой поверхности степенной функцией

Ниже приводится таблица значений коэффициентов k и b , также значения критерия достоверности линейной аппроксимации R^2 для степенного уравнения (Таблица 4).

Пример обработки дробно-линейным уравнением длительной прочности.

Уравнение (27) преобразовывается в виде линейной функции $y = kx + b$:

$$\ln \frac{\tau_0 - \tau}{\tau - \tau_\infty} = \alpha \cdot \ln(t_p + 1) - \alpha \cdot \ln \frac{T}{\delta}, \quad (30)$$

где $y = \ln \frac{\tau_0 - \tau}{\tau - \tau_\infty}$; $x = \ln(t_p + 1)$; $k = \alpha$; $b = -\alpha \cdot \ln \frac{T}{\delta}$.

Ниже приводится пример графического отображения, полученных в ходе релаксации напряжения, данных лобового сопротивления зонда и данных трения по боковой поверхности.

Рисунок 55 иллюстрирует пример обработки линеаризованных данных по лобовому сопротивлению зонда в процессе испытания со стабилизацией. Величина достоверности линейной аппроксимации данных R^2 в этом случае составляет 0,9997.

На основе полученных коэффициентов $k=0,2768$ и $b=-0,2462$ выводится уравнение длительной прочности на сжатие:

$$\ln \frac{\sigma_{c0} - \sigma_c}{\sigma_c - \sigma_{c\infty}} = 0,276 \cdot \ln t_p + 0,246$$

и преобразовывается в дробно-линейное уравнение 3:

$$\sigma_c(t) = \frac{1,279 \cdot 4,788 + t_p^{0,276} \cdot 0,583}{1,279 + t_p^{0,276}},$$

где σ_c — прочность грунта на сжатие.

Линеаризованный график лобового сопротивления

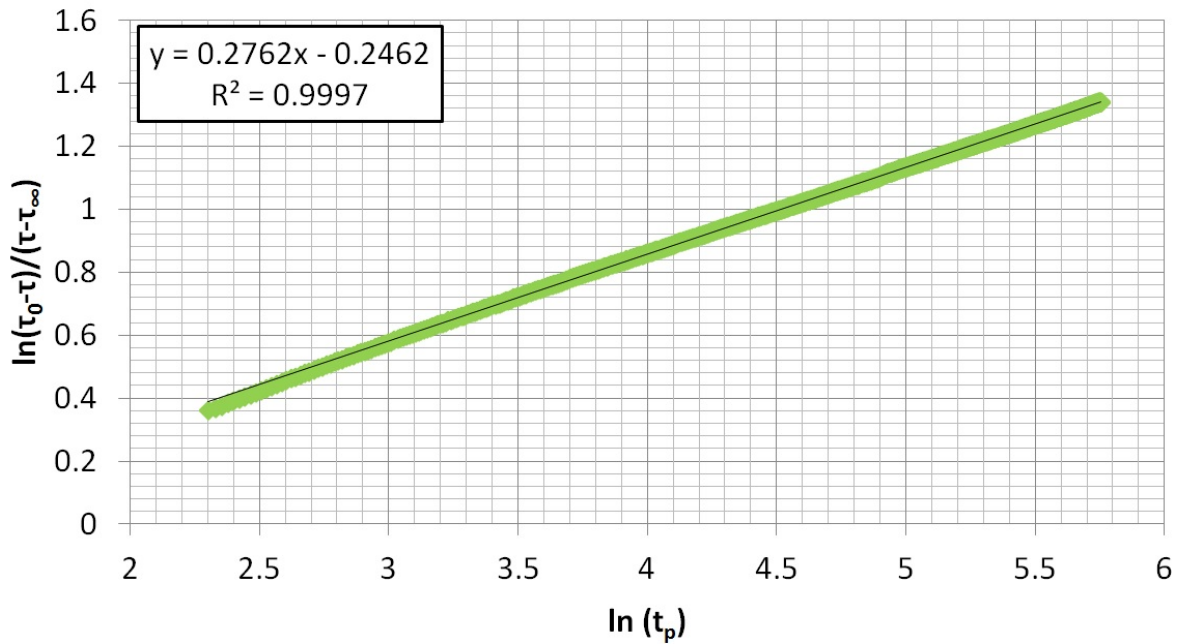


Рисунок 55 — Пример обработки данных лобового сопротивления дробно-линейной функцией

Аналогично обрабатываются данные по сопротивлению зонда вдоль боковой поверхности в процессе стабилизации.

Рисунок 56 иллюстрирует метод обработки данных. Величина достоверности линейной аппроксимации данных в этом случае составляет 0,989.

Линеаризованный график сопротивления вдоль боковой поверхности

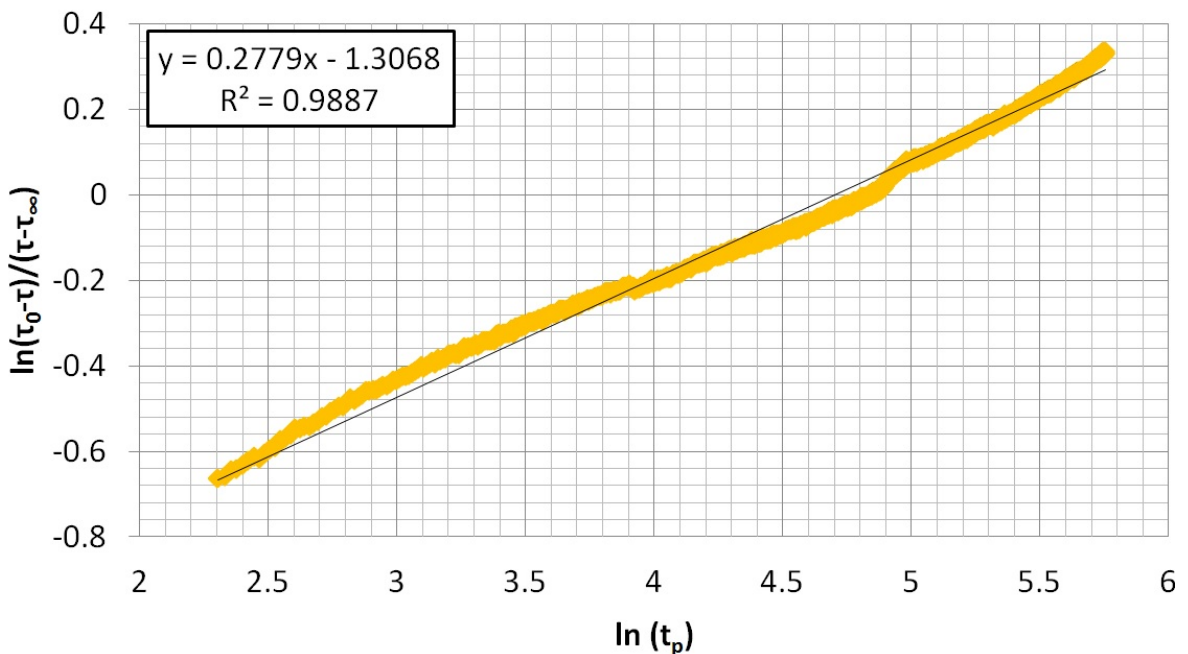


Рисунок 56 — Пример обработки данных сопротивления вдоль боковой поверхности дробно-линейной функцией

На основе полученных коэффициентов $k=0,2779$ и $b=-1,3068$ выводится уравнение длительной прочности на сдвиг:

$$\ln \frac{\sigma_{s0} - \sigma_s}{\sigma_s - \sigma_{s\infty}} = 0,278 \cdot \ln t_p + 1,307,$$

и преобразовывается в дробно-линейное уравнение (31):

$$\sigma_s(t) = \frac{3,694 \cdot 0,103 + t_p^{0,278} \cdot 0,004}{3,694 + t_p^{0,278}},$$

где σ_s — прочность грунта на сдвиг.

Ниже приводится таблица значений коэффициентов k и b , также значения критерия достоверности линейной аппроксимации R^2 для дробно-линейного уравнения (Таблица 5).

Рассмотренные выше уравнения длительной прочности хорошо описывают процесс релаксации напряжения в мерзлом грунте, что иллюстрируют близкие к 1 значения критерия достоверности линейной аппроксимации R^2 . Установлено, что по характеру релаксации напряжения можно судить о степени проявления реологических свойств, напрямую зависящих от типа грунта и льдистости. Так для суглинка характерен более плавный характер релаксации напряжений, в песках же релаксация происходит стремительнее.

Важно обозначить границы применимости приведенных выше уравнений длительной прочности:

1. Полученные замеры релаксации напряжения под наконечником зонда практически сразу подчиняются описываемым функциям. Функциональны и дают хорошие результаты все данные, начиная с 10-й секунды записи, что подтверждается близкими к 1 значениями критерия достоверности линейной аппроксимации R^2 .
2. Обработка результатов замера релаксации напряжений грунта вдоль боковой поверхности показала функциональность получаемых данных, во всех замерах начиная лишь с 300-й секунды записи. Предполагается, что за это время происходит вмерзание зонда в грунт, после чего основные изменения показаний датчиков происходят за счет процессов реологии. Это также подтверждается близкими к 1 значениями критерия достоверности линейной аппроксимации R^2 данных по сопротивлению вдоль боковой поверхности.

Следует отметить, что в ходе работы с блоком данных сопротивления грунта вдоль боковой поверхности был проведен ряд проверок корректности выполняемых расчетов и полученных результатов на основе коэффициентов детерминации и корреляции и установлено, что характер релаксации напряжения вдоль боковой поверхности несколько отличается от сопротивления под наконечником зонда. Данные релаксации напряжения по боковой поверхности практически не зависят от характера движения зонда в грунте и релаксации напряжений под наконечником.

В процессе обработки данных установлено, что при избыточном нагреве зонда во время движения и образовании вокруг зонда зоны жидкой воды и подтаявшего грунта некоторая часть записанных данных не отвечает рассматриваемым функциональным зависимостям. Для достижения качественного результата замера длительной прочности грунта сдвигу следует дожидаться стабилизации температуры зонда в мерзлом грунте, смерзания муфты трения зонда с грунтом.

Установлено, что для получения качественных результатов замера релаксации напряжения датчик сопротивления грунта вдоль боковой поверхности должен обладать высокой чувствительностью и запись данных должна быть выполнена с частотой не менее 2 раз в секунду. Это также позволяет оценить характер релаксации напряжения уже на этапе сбора полевых данных и существенно улучшает качество получаемого замера.

Значения сопротивления грунта вдоль боковой поверхности, в большей степени, нежели под наконечником зонда, подвержены влиянию как температурного режима грунта в зоне, прилегающей к зонду в процессе движения, так и свойств самих грунтов.

В ходе обработки полученных данных установлено, что логарифмическое уравнение длительной прочности (25) наиболее универсально подходит для описываемого процесса релаксации напряжения в мерзлом грунте. Наибольшая универсальность логарифмического уравнения длительной прочности также отмечалась С.С. Вяловым в работе [15]. Однако обработка данных только линеаризацией функции не позволяет оценить качество выполненного испытания и получить однозначное решение уравнения. Для этого необходимо применить более точный инструмент оценки получаемых данных.

Таблица 3 — Коэффициенты линейных уравнений длительной прочности и величина достоверности линейной аппроксимации для σ_c и σ_s логарифмической функции (составлено автором)

Группа замеров	Лобовое сопротивление			Трение вдоль боковой поверхности		
	<i>k</i>	<i>b</i>	R ²	<i>k</i>	<i>b</i>	R ²
1	0.1172	1.3224	0.9930	25.5760	-91.1140	0.9410
2	0.1833	0.2110	0.9940	38.2090	-118.4600	0.9790
3	0.0782	0.2941	0.9980	4.6117	-4.3246	0.9900
4	0.0700	0.2084	0.9998	55.5740	-265.1300	0.9580
5	0.0402	0.2735	0.9997	1.2660	5.3607	0.9892
6	0.0150	-0.0433	0.9920	3.2256	-16.3550	0.9528
7	0.0212	-0.0489	0.9937	4.0813	-18.2870	0.9830
8	0.0140	0.0235	0.9971	7.2682	-31.9030	0.9743
9	0.0125	0.0247	0.9974	2.0883	-6.6427	0.9885

Таблица 4 — Коэффициенты линейных уравнений длительной прочности и величина достоверности линейной аппроксимации для σ_c и σ_s степенной функции (составлено автором)

Группа замеров	Лобовое сопротивление			Трение вдоль боковой поверхности		
	k	b	R ²	k	b	R ²
3.5	-0.0626	-0.3312	0.9882	-0.1905	-2.9776	0.9216
4.5	-0.1798	0.7846	0.9998	-0.3611	-2.4979	0.9695
5.5	-0.1341	1.1448	0.9998	-0.1274	-2.3431	0.9765
6.5	-0.1280	1.2307	0.9967	-0.5110	-1.1393	0.9772
7.5	-0.0873	1.1854	0.9973	-0.0209	-2.4204	0.6685
8.5	-0.1313	3.8947	0.9160	-0.5275	2.0842	0.9837
9.5	-0.1431	3.4001	0.9080	-0.4722	0.9881	0.9808
10.5	-0.0979	2.8169	0.9900	-0.3502	-0.3719	0.9437
11.5	-0.0827	2.8048	0.9694	-0.2503	0.2816	0.9568

Таблица 5 — Коэффициенты линейных уравнений длительной прочности и величина достоверности линейной аппроксимации для σ_c и σ_s дробно-линейной функции (составлено автором)

Группа замеров	Лобовое сопротивление			Трение вдоль боковой поверхности		
	k	b	R^2	k	b	R^2
3.5	0.1291	-0.0947	0.9860	0.3284	-1.0784	0.9405
4.5	0.3954	-0.4200	0.9991	0.5404	-1.7294	0.9864
5.5	0.2762	-0.2462	0.9997	0.2779	-1.3068	0.9887
6.5	0.2480	-0.2070	0.9962	0.6956	-2.2689	0.9933
7.5	0.1780	-0.2173	0.9958	0.0639	-1.0967	0.684
8.5	0.7245	-4.7355	0.9989	1.3277	-7.8551	0.9982
9.5	0.7461	-4.7614	0.9997	2.0159	-11.8970	0.9953
10.5	0.3143	-1.7215	0.9997	1.0684	-6.3952	0.9999
11.5	0.4162	-2.8054	0.9948	1.5696	-10.659	0.9946

При разработке нового подхода и критерия для определения необходимого и достаточного времени испытания, необходимо разработать новую методику для определения времени, начиная с которого кривая релаксации измеряемого напряжения (лобового сопротивления или бокового трения) подчиняется приведенному выше уравнению длительной прочности [11]. Для решения этой задачи был автором был разработан алгоритм обработки данных статического зондирования, который исходит из описанного выше деления кривой релаксации на 2 участка. Иллюстрация этапов обработки данных разработанным алгоритмом представлена ниже (Рисунок 57).

После начала теста на измерение релаксации напряжения, выбирается интервал для обработки кривой. В данном примере использован интервал в 100 секунд. Однако он может быть изменен, исходя из точности используемого оборудования. После первых 100 секунд, вычислительная машина (компьютер) в поле производит обработку записанных данных. В качестве примера рассмотрим интервал от 600-й до 700-й секунды, который обрабатывается в соответствии с вышеизложенной методикой (Рисунок 51, Рисунок 52).

Для наглядности обрабатываемый интервал кривой релаксации напряжений выделен красным цветом (Рисунок 57а). Кривая перестраивается в логарифмических координатах, а полученный отрезок аппроксимируется линейной функцией (интервал отображен красным цветом, Рисунок 57б) и вычисляются коэффициенты k и b для конкретного участка измеряемой кривой. Далее выводится функция длительной прочности, как показано выше для формулы и рассчитывается длительная прочность грунта на 100 лет. По выведенной функции можно рассчитать длительную прочность для любого временного отрезка, и для примера на Рисунок 57в помимо значения для 100 лет (красная звездочка), также приводится значение для 10 дней (красный квадрат).

Таким образом, получается результат для одной итерации предлагаемой методики для выбранного отрезка кривой. В описании данного примера это седьмая итерация. Шесть предыдущих итераций были выполнены для участков кривой с 1-ой по 100-ую секунду (первая итерация), с 100-ой по 200-ую секунду (вторая итерация) и т.д. и отображены синим цветом, соответственно (Рисунок 57в). Другими словами, данный вычислительный алгоритм был выполнен для предыдущих интервалов, а соответствующие значения длительной прочности для каждого интервала рассчитаны отдельно.

На рисунке (Рисунок 57в) видно, что рассчитанные значения длительной прочности, начиная с 400-й секунды, стабилизировались и равны 3,4 МПа для 100 лет и 5,1 МПа для 10 дней. В свою очередь видно, что напряжение, измеряемое непосредственно зондом, продолжает изменяться (Рисунок 57а). Это говорит о том, что график кривой релаксации измеряемого напряжения (в рассматриваемом примере лобового сопротивления) подчиняется уравнению длительной прочности.

Показано 7 итераций с шагом в 100 секунд. Однако при полевом замере релаксации количество итераций равно количеству полученных значений при сборе данных, что определяется частотой считывания данных. Если данные считываются каждую секунду, то и расчет длительной прочности также выполняется каждую секунду.

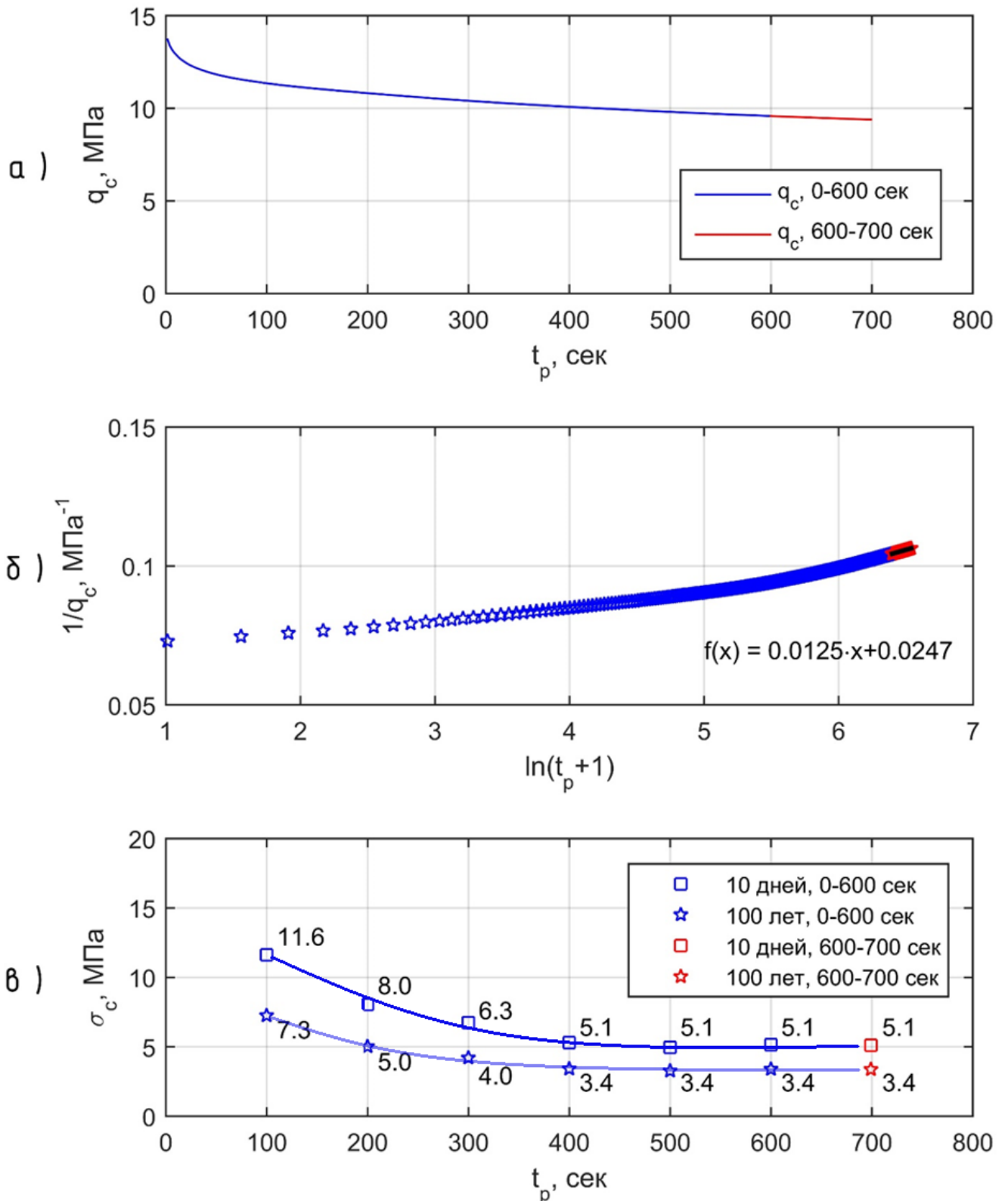


Рисунок 57 — Пример обработки кривой релаксации лобового сопротивления по предлагаемой методике, где а — кривая релаксации напряжения, получаемая в полевых условиях; б — линейризация кривой в обратных и логарифмических координатах; в — расчетные значения длительной прочности, полученные путем решения логарифмического уравнения длительной прочности [11]

Ниже показан вид полевого терминала сбора данных и пример построения кривой длительной прочности по разработанной методике (Рисунок 58, Рисунок 59, Рисунок 60). На рисунках линиями показаны такие показатели зондирования, как:

- Depth — глубина проведения испытания, м;
- Cone — измеряемое лобовое сопротивление — q_c , МПа;
- Friction — измеряемое трение грунта по боковой поверхности — f_s , МПа;
- Limit Compression — рассчитываемое значение длительной прочности на сжатие — σ_c , МПа.

Рисунок 59 отражает, что кривая длительной прочности («опережающая» кривая) стремится к горизонтальной асимптоте, что является следствием релаксации напряжения и при достижении кривой горизонтального положения будет получено значение предельно-длительной прочности для конкретного замера мерзлого грунта. Начиная с 11 мин. (Рисунок 60) кривая длительной прочности строится горизонтально, это доказывает, что достигнут второй участок кривой релаксации и коэффициенты уравнения (25) постоянны. Значение длительной прочности данного мерзлого грунта на сжатие составляет 2200 кПа и не меняется со временем.

Приведенный выше вычислительный алгоритм, опубликован [8, 11] и внедрен автором в используемое в полевых условиях программное обеспечение для сбора данных, это обеспечивает вывод на экран кривой рассчитанной длительной прочности в реальном времени, что представляет большую ценность при полевых испытаниях. Это позволяет инженеру-геологу в полевых условиях удостовериться, что замер релаксации напряжений достиг необходимого и достаточного времени испытания. Это позволяет оценить качество выполняемого испытания и при необходимости, в случае получения неадекватных значений, переделать испытание. Также, разработанный вычислительный алгоритм позволяет в полевых условиях получить первичную информацию о прочностных характеристиках исследуемых грунтов и при необходимости скорректировать количество испытаний. Использование программного обеспечения с описанным алгоритмом позволяет на месте проведения испытания задавать критерии его окончания, а именно величину изменения рассчитываемого значения длительной прочности и времени, в течение которого наблюдается данное изменение. Например, критерий окончания теста может выглядеть следующим образом: изменение рассчитываемого значения длительной прочности грунта не должно превышать 0,1 МПа в течение 5 минут.

Расчет несущей способности свай. Расчет несущей способности свай на основе результатов, обработанных описанными уравнениями длительной прочности для любых заданных интервалов времени, основан на схожем подходе, практикуемом для расчета свай, а именно – последовательное суммирование значений лобового сопротивления и бокового трения. Отличие состоит в том, что в разработанной методике не применяются поправочные или иные другие эмпирические коэффициенты.

Расчет производится по формуле:

$$F_{ui} = R_c \cdot A + \sum R_{af,i} \cdot A_{af,i} , \quad (32)$$

где $R_c = \sigma_c$ – среднее значение прочности грунта на сжатие, полученное путем осреднения значений на один диаметр выше и четыре диаметра ниже наконечника зонда; A – площадь поперечного сечения свай; $R_{af,i} = \sigma_s$ — прочность грунта на сдвиг; $A_{af,i}$ — площадь поверхности срезания i -го слоя грунта с боковой поверхностью свай, m^2 .

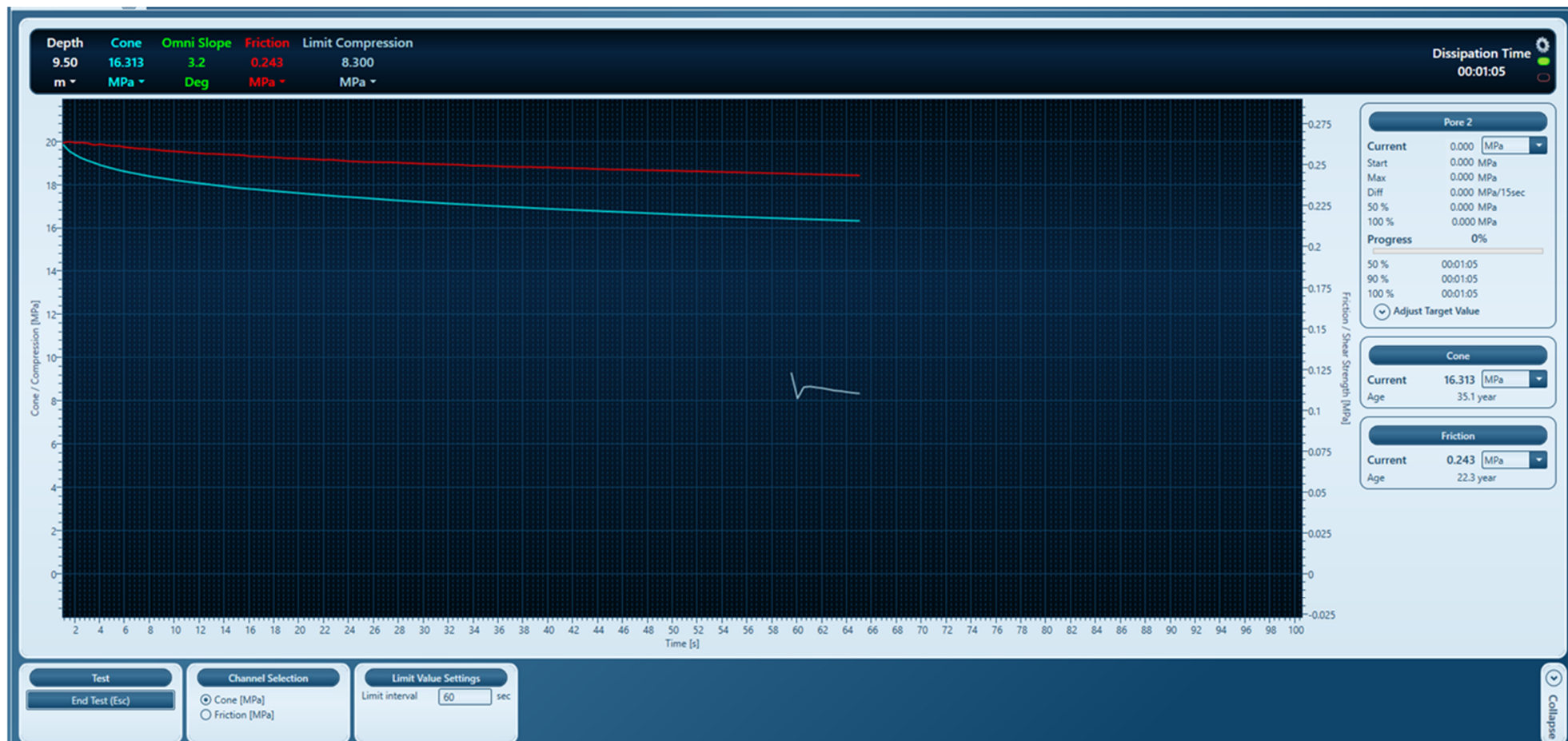


Рисунок 58 — Полевой замер релаксации напряжения в мерзлом грунте (время замера – 1 мин.)



Рисунок 59 — Полевой замер релаксации напряжения в мерзлом грунте (время замера – 11 мин.)

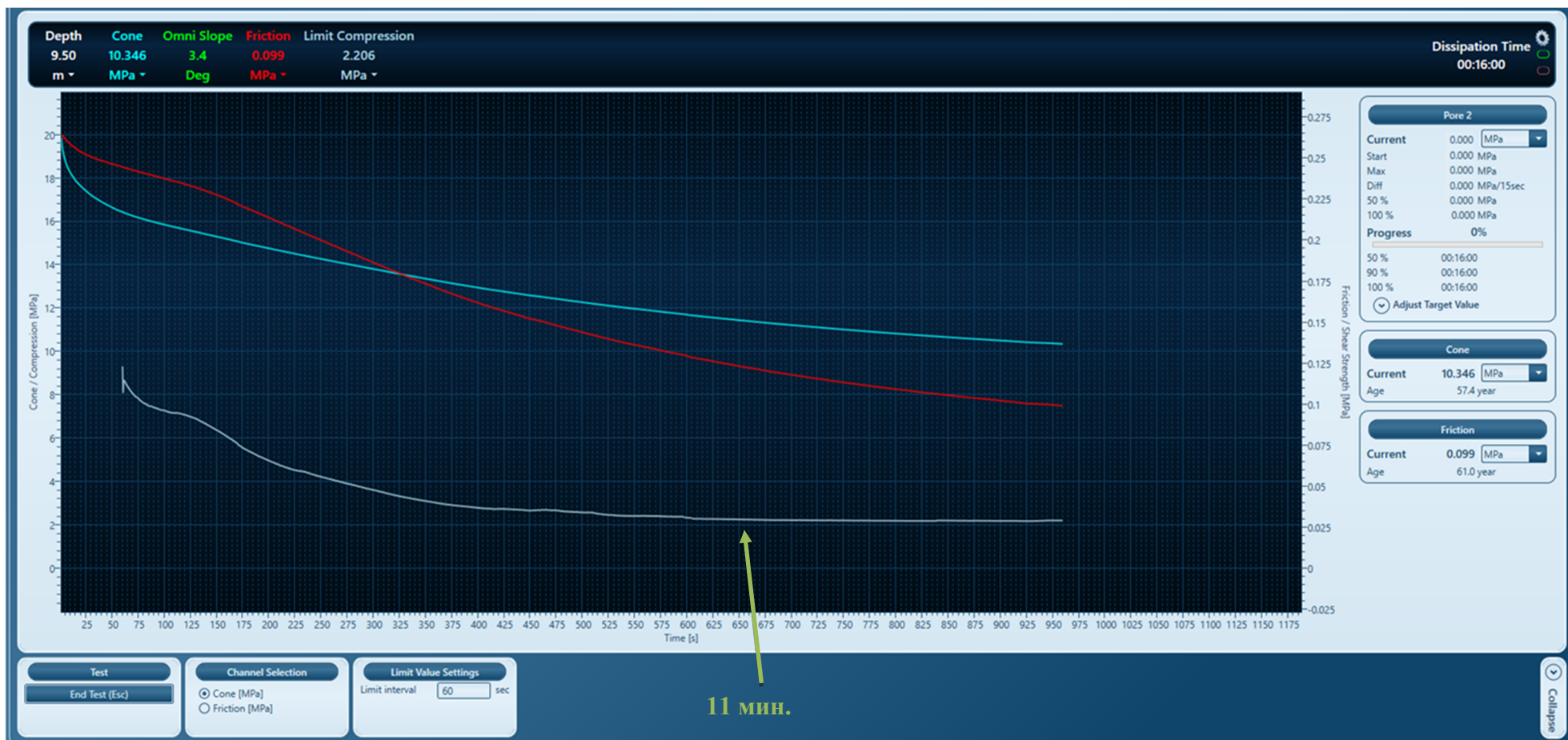


Рисунок 60 — Полевой замер релаксации напряжения в мерзлом грунте (время замера – 16 мин.)

Важно подчеркнуть, что методика такого расчета сходна с описанной методикой в [78], однако в ней отсутствуют поправочные и эмпирические коэффициенты. Основой расчета служат полученные значения длительной прочности грунта. Значения берутся напрямую и суммируются. Расчет производится для вычисленных значений σ_c и σ_s каждого замера релаксации напряжения на испытуемых глубинах. Интервал времени может быть задан как несколько дней, в случае натурного испытания сваи статической нагрузкой, так и 50-100 лет для оценки предельно-длительной несущей способности сваи в целях расчетов проектирования.

Выводы

1. Разработана новая методика проведения испытаний статического зондирования мерзлых грунтов и обработки получаемых данных для определения длительной прочности мерзлых грунтов на сжатие и сдвиг, а также последующего расчета несущей способности забивных свай.
2. Методика полевых испытаний основана на предложении о прерывистом зондировании со «стабилизацией», разработка которого активно велась в 1960–1980-х годах. Однако в то время этот подход не был реализован в виду недостаточного технического оснащения и отсутствия проработки некоторых технических решений, применяемых в современном оборудовании (конструкция гидравлической системы вдавливания зонда и использование цифровой системы сбора и записи данных).
3. Показано, что применение статического зондирования для мерзлых грунтов со «стабилизацией» длительностью первые десятки минут достаточно для определения их реологических свойств, таких как длительная прочность, как на сжатие, так и на сдвиг, что связано со временем релаксации напряжений во льду 10^2 - 10^3 с. Разработан новый алгоритм расчета длительной прочности, встраиваемый в цифровую систему сбора данных в поле, который позволяет с заранее заданной точностью определить длительную прочность мерзлого грунта непосредственно в поле.
4. Методика обработки получаемых данных использует теоретические предпосылки, разработанные С.С. Вяловым и используемые в лабораторном динамометрическом методе для определения длительной прочности грунтов по кривым релаксации напряжений. Обработка полученных результатов показала высокие значения критериев достоверности линейной аппроксимации, что говорит о высокой точности выполняемых измерений и подчинении измеренной релаксации напряжений физическим законам реологии, описываемым логарифмическим уравнением ядра релаксации.

ГЛАВА 5. ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

5.1 Геокриологические условия территории применения разработанной методики

Согласно литературным данным Сергеева В.М., Трофимова В.Т., Ершова Э.Д., Зылевой Л.И., Коновалова А.Л. и др. [17, 30, 31, 54] изучаемый район приурочен к области прерывистого распространения ММГ. В этой области ММГ занимают 70–80% площади. Здесь талые отложения, как правило, встречаются непосредственно под руслами крупных рек (Обь и Полуй), а также в прирусловых залесенных частях пойм. На водоразделах и надпойменных террасах (за редким исключением) повсюду развиты мерзлые породы. Наличие таликовых зон на более высоких участках может быть связано с глубинными тектоническими разломами. В южной части этой области наблюдается двухслойное по вертикали развитие ММГ.

На террасах и склонах водораздельного плато долины р. Обь среднегодовые температуры грунтов изменяются от $-0,1$ до -3°C , а под торфяниками иногда ниже -4°C . Температура мерзлых грунтов поймы изменяется от 0 до -2°C [17].

Мощность ММГ сильно изменяется по площади в зависимости от геоморфологической ситуации. На правом берегу р. Обь с поверхности залегает мерзлая толща, мощность которой изменяется от 25 до 80 м. В пределах поймы р. Обь мощность ММГ изменяется от 20 до 80 м, увеличиваясь от прирусловых отмелей к высокой пойме. Под руслом р. Обь мерзлые породы отсутствуют. Подошва верхнего слоя мерзлоты залегает на глубине от 20 до 78 м. Мощность межмерзлотного слоя изменяется от 10 до 25 м, увеличиваясь к югу до 60 м и более. Кровля реликтовой мерзлоты залегает на глубинах 100–200 м, мощность ее — до 170 м [17, 30].

В пределах поймы р. Обь преимущественно развиты ММГ, а также участки несливающихся мерзлых толщ, т.е. здесь развиваются и сезонноталый, и сезонномерзлый слои. Мощность первого – от 0,6 до 2 м. На прирусловых отмелях нередко наблюдается современная трансформация сезонномерзлых грунтов в многолетнемерзлые. Мощность сезонномерзлого слоя максимально может достигать 3 м.

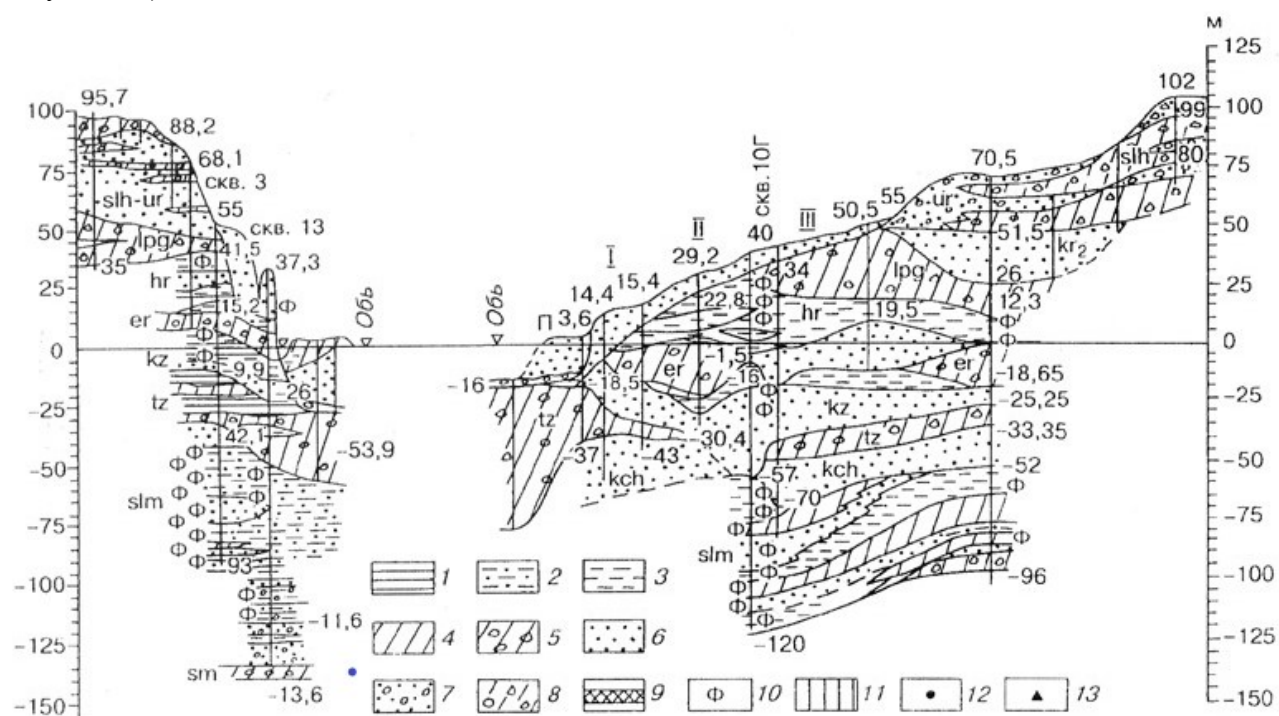
Самая характерная криолитологическая особенность области – повышенная мощность толщи голоценовых отложений поймы р. Обь (до 25–30 м). Состав этой толщи преимущественно суглинистый, и в верхней части разреза она промерзала сингенетически, что определяется по криогенному строению. Мощность такой сингенетически промерзшей части нередко превышает 8–10 м. Льдистость достигает 60–70% [17].

Для эпикриогенных суглинисто-глинистых пород, слагающих незаторфованные участки поверхности террас, характерна невысокая объемная льдистость, что обусловлено большим количеством незамерзшей воды в них. Однако шпировая объемная льдистость этих пород не опускается ниже 10%. Существенно ниже льдонасыщенность пород песчано-супесчаного состава, она редко достигает 30%, криогенная текстура здесь обычно массивная [17].

Наибольшей льдонасыщенностью характеризуются суглинистые породы, перекрытые сверху слоем торфа мощностью 2–4 м. Им свойственны слоистые, сетчатые, крупношлировые криогенные текстуры. Именно такие породы слагают подавляющую часть территории всех надпойменных террас. В пределах торфяных массивов криогенное строение нередко

усложняется в основном за счет присутствия сегрегационных и повторно-жильных льдов. Торф часто сильно льдонасыщен — объемная льдистость до 80–90% [17].

Схематичный геологический разрез через р. Обь в районе г. Салехард по данным [4, 5, 6] (Рисунок 61).



1 — ленточные глины; 2 — алевриты, алевритистые глины; 3 — глины; 4 — суглинки; 5 — валунные суглинки и супеси (морены); 6 — пески; 7 — галечники; 8 — валунные пески и супеси (морены); 9 — торфяники, растительная сечка; 10 — фораминиферы; 11 — лессовидные суглинки; 12 — ^{14}C даты; 13 — ТЛ и ЭПР даты.

Индексы слоев: sm — самаровские; slm — салемальские; tz — тазовские; kch — корчагинские; kz — казанцевские; er — ермаковские; hr (kr₁) — харсоимские (нижнекаргинские); zlt (kr₂) — золотомыские (нижнекаргинские); lpg — лохподгорские; kr₂ — верхнекаргинские; slh — салехардоувальские; ur — уртамские; slh-ur — нерасчлененные салехардоувальские и уртамские. Номера позднеледниковых, гляциоэвстатических террас: III — третья; II — вторая; I — первая; П — пойма.

Рисунок 61 — Геологический разрез четвертичных отложений через р. Обь в районе г. Салехард [4]

Согласно вертикальной гидродинамической зональности Западно-Сибирского артезианского бассейна, в районе Салехарда выделяются два гидрогеологических этажа. Верхнему соответствует водоносный комплекс четвертичных отложений, нижнему — водоносный комплекс мезозойских отложений. Наличие в разрезе четвертичной толщи многолетнемерзлых пород определяет сложные условия формирования подземных вод. Здесь развиты надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные воды [38].

Надмерзлотные воды сезонноталого слоя — безнапорные, глубина залегания 1–2 м, повсеместны. Пресные воды, бикарбонатные, хлоридно-натриево-магниевые-кальциевые, слабой общекислотной агрессивности.

Межмерзлотные воды не имеют сплошного распространения и не имеют гидравлической связи с надмерзлотными водами. Дебит скважин незначителен. Воды напорные, их глубина 10–13 м. Не имеют практического значения.

Подмерзлотные воды имеют повсеместное распространение, характеризуются малым дебитом и повышенной минерализацией, не рекомендованы для городского водоснабжения. Грунтовые воды, приуроченные к талой песчано-гравийной толще аллювиального горизонта, характеризуются как пресные, бикарбонатные, хлоридно-натриево-магниевые-кальциевые,

обладают слабой общекислотной и углекислотной агрессивностью по отношению к конструкциям из бетона нормальной проницаемости на обычном портландцементе [38].

Криогенные и посткриогенные образования этой зоны представлены только жильно-полигональным рельефом в стадии консервации и вытаявания. Здесь же развиты разнообразные формы остаточной стадии развития мерзлой толщи в виде западинно-бугристого рельефа и крупнобугристого рельефа, бугристых торфяников, термокарстовых озер и остаточных котловин, возникших в результате вытаявания льдов. Можно встретить псевдоморфозы по повторно-жильным льдам и бугры пучения, которые образуются в местах разгрузки напорных подземных вод. Также встречаются солифлюкционные явления на отдельных склонах [31].

В части криогенных явлений, на описываемой территории широко развиты термоэрозионные процессы на правом берегу р. Обь, где образованы овраги длиной 0,3–0,6 км, активно развивающиеся, с временными водотоками. Наиболее активное развитие оврагов связано с весенним снеготаянием.

Также, стоит отметить встречающиеся сингенетические верхнеплейстоценовые повторно-жильные льды. Широко развиты процессы сезонного и многолетнего пучения и термокарста, часто приуроченного к полигонально-жильным массивам в пределах торфяников [17].

Инженерно-геологические условия на данной территории определяются, прежде всего, пространственными закономерностями размещения, мощностью, строением, составом и свойствами рыхлых нелитифицированных неоген-четвертичных отложений. Практический интерес в инженерно-геологическом отношении представляют горные породы, слагающие первые 15–25 м верхней части земной коры [23].

В пределах территории эту часть разреза слагают породы терригенной формации неоген-четвертичного возраста. Они представлены образованиями морского и континентального генезиса. Наибольшим распространением пользуются четвертичные отложения аллювиально-озерного и аллювиально-морского генезиса песчано-глинистого состава различной мощности.

Испытания мерзлых грунтов статическим зондированием на перечисленных площадках выполнялись в период с 2014 по 2019 годы, всего было выполнено и обработано около 1500 погонных метров статического зондирования (Рисунок 62).

1. *Салехард, Лабытнанги.* В 2014 г. были выполнены испытания статическим зондированием многолетнемерзлых грунтов в рамках инженерно-геологических изысканий на нескольких площадках в городах Салехард и Лабытнанги, Ямало-Ненецкого автономного округа. 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, другими словами, не зафиксировано раннего отказа по лобовому сопротивлению, что характерно для твердых и/или прочных грунтов, и не потребовалось разбуривания. Максимальная глубина зондирования составила 34 метра.
2. *Воркута.* В 2015 г. в ходе инженерно-геокриологической практики МГУ была выполнена задача по диагностике основания железнодорожной насыпи, расположенной недалеко от Воркуты. Статическое зондирование было выполнено непосредственно с

железнодорожной платформы-вагона в течение 3-х часового окна в расписании движения поездов. Глубина зондирования составила 12 метров.

3. *Салехард*. В декабре 2016 года было выполнен пилотный проект, где с помощью статического зондирования была оценена эффективность работы термостабилизаторов, установленных около свай основания Ямальского полярного агроэкономического техникума. Мерзлые грунты под Ямальским полярным агроэкономическим 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.
4. *Обская губа*. В 2017 г. был опробован новый зонд производства компании Фугро для статического зондирования на полуострове Гыданский. 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°C .
5. *Мост через р. Обь*. В 2018 г. в районе городов Лабытнанги и Салехард были выполнены испытания грунтов статическим зондированием по берегам и в русловой зоне р. Обь. В ходе этих работ была оценена изменчивость инженерно-геокриологических условий в левобережной (низкий берег, затапливаемая пойма), правобережной (высокий берег) и русловой зонах реки. Был установлен мировой рекорд статического зондирования мерзлого грунта на глубину 62 м. Важным элементом данной работы было дальнейшее совершенствование методики расчета несущей способности свай для мерзлых грунтов на основе замеров предельно-длительной прочности.
6. *Новый Уренгой*. В 2019 г. проводились работы по диагностике грунтового основания в городской черте Нового Уренгоя. В условиях техногенной нагрузки на опытной площадке происходит деградация массива мерзлых грунтов, что было установлено в результате испытаний статическим зондированием. Также в ходе этих работ впервые был выполнен пробоотбор мерзлого грунта при помощи установки статического зондирования с выполнением комплекса лабораторных исследований, что позволило провести более детальную интерпретацию данных статического зондирования.

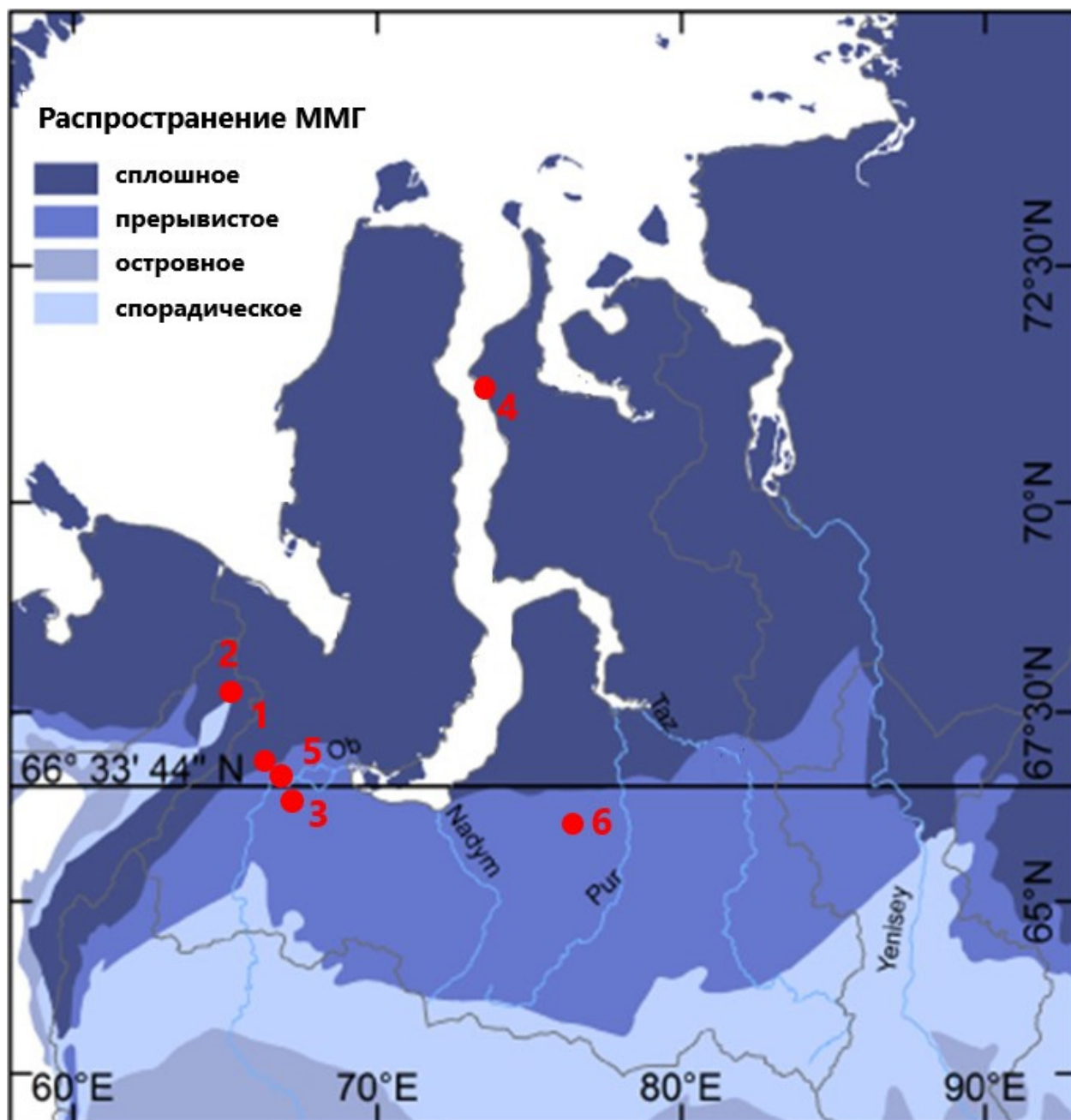


Рисунок 62 — Расположение опытных площадок исследований на карте-схеме распространения многолетнемерзлых грунтов [96] на исследуемой территории (описание в тексте, составлено автором)

1. 2014 — Лабытнанги (Площадки строительства);
2. 2015 — Воркута (РЖД, ст. Полярный Урал);
3. 2016 — Салехард (Площадки строительства);
4. 2017 — Гыданский п-ов (Арктик СПГ-2);
5. 2018 — Мост через р. Обь (Северный широтный ход);
6. 2019 — Новый Уренгой (Площадки строительства).

Ниже приводятся примеры решения наиболее характерных задач, связанных с проектированием и обслуживанием инфраструктуры в зоне распространения ММГ с применением статического зондирования по разработанным методикам.

5.2 Опыт статического зондирования на твердомерзлых грунтах

В 2017 г. технология статического зондирования была применена на полуострове Гыданский [49]. Инженерно-геокриологические условия на площадке исследования характеризовались сплошным распространением ММГ с твердомерзлыми грунтами (песками) и среднегодовой температурой грунта на глубине нулевых годовых амплитуд -6°C . Впервые твердомерзлые грунты являлись предметом изучения методом статического зондирования. Были проведены испытания статическим зондированием твердомерзлого песка при температуре -6°C . Зонд, использованный при испытаниях, измерял следующие параметры: лобовое сопротивление, боковое трение, температуру и электрическое сопротивление (Рисунок 63).

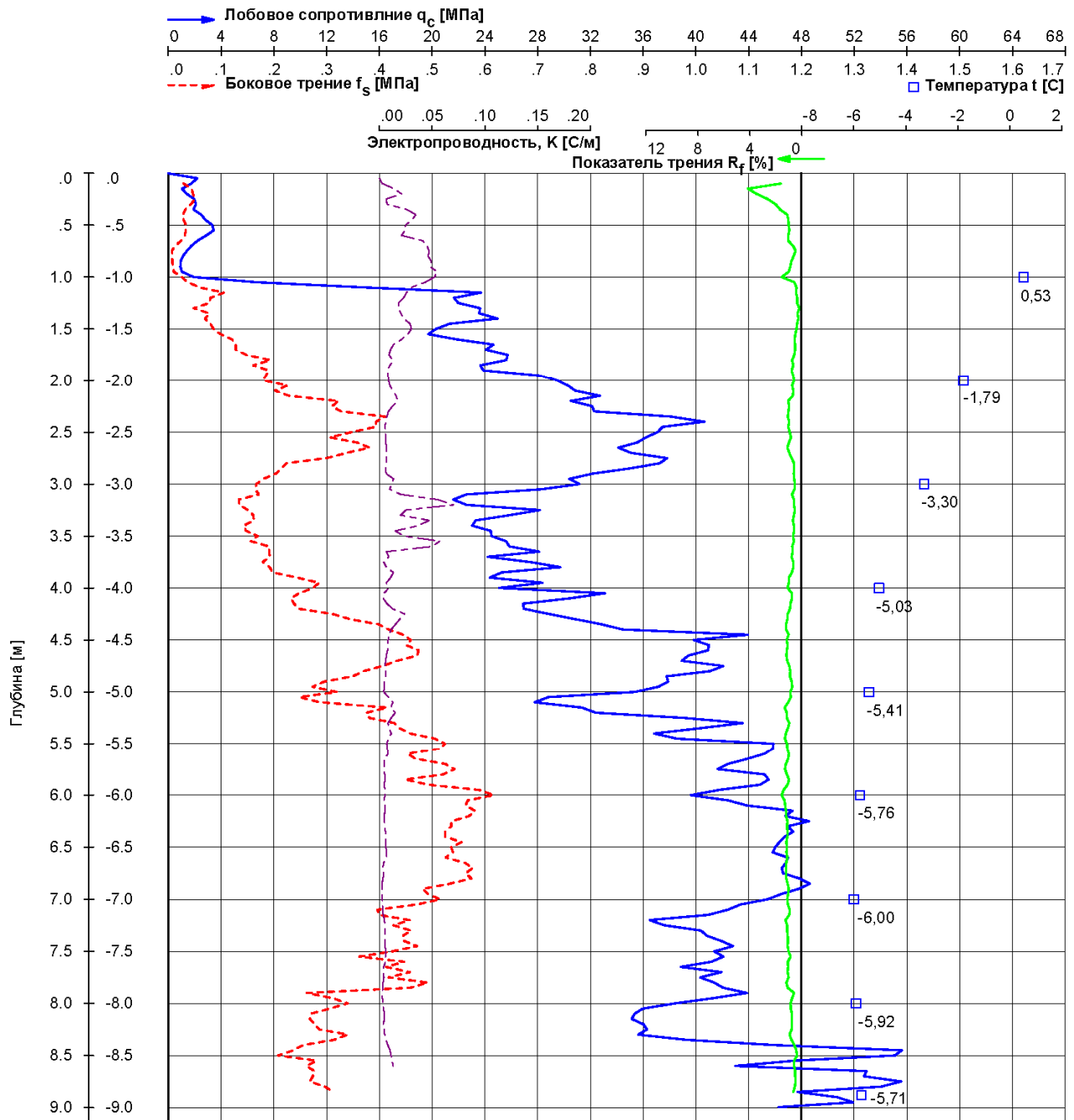


Рисунок 63 — Профиль статического зондирования на Гыданском полуострове, песок твердомерзлый (данные автора)

Значения лобового сопротивления, q_c в мерзлом песке изменялись от 20 МПа до 55 МПа, а значения бокового трения, f_s — от 100 кПа до 600 кПа. Это высокие значения и характеризуют плотные пески. Электропроводность, K (сопротивление) было также измерено и значения изменялись между 0.0023 См/м (440 Ом*м) и 0.0705 См/м (14 Ом*м). Важно отметить, что на глубине от 3.0 м 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 значений лобового сопротивления (q_c) по сравнению со значениями для песка, залегающего ниже, а именно $q_c = 22 - 28$ МПа в интервале засоленного мерзлого песка и $q_c = 36 - 48$ МПа в интервале незасоленного мерзлого песка ниже. Данные соотношения качественно соответствуют соотношениям рекомендуемых значений, приведенных в табл. В.9 СП 25.13330.2012. Измеренные температуры также показаны маркерами (Рисунок 63).

На профиле лобового сопротивления, полученном с помощью статического зондирования (Рисунок 63), на глубине 1 м четко виден резкий переход от 1 МПа к 24 МПа, что интерпретируется как переход от талого к мерзлomu состоянию грунта, другими словами, глубина сезонного оттаивания. Это подтверждается замером температуры на этой глубине, где температура грунтов близка к 0°C. На глубине 7 м замерен температурный минимум равный – 6°C. Ниже температура грунта постепенно повышается, достигая значения –5.71°C на глубине 9 м. Полученный температурный профиль полностью согласуется с современными теоретическими представлениями о температурном режиме многолетнемерзлых грунтов в слое нулевых годовых амплитуд температуры.

5.3 Определение длительной прочности различных типов мерзлых грунтов

Испытания мерзлых грунтов статическим зондированием, в том числе, для проверки разработанной методики выполнялись в период с 2014 по 2019 годы на 6 площадках, всего было выполнено и обработано около 1500 погонных метров статического зондирования на мерзлых грунтах. Полученные данные были обработаны в соответствии с разработанной методикой определения длительной прочности и проанализированы в соответствии с выделенными литологическими разностями.

Для грунтов, охарактеризованных на всех площадках исследований, оценивались средние значения σ_c , и σ_s длительной прочности (Таблица 6). Было выполнено сравнение полученных данных с рекомендуемыми значениями давления под нижним концом свай (R) и сопротивлением грунта по поверхности смерзания (R_{af}), приведенными в табл. В.1 и В.3 СП 25.13330.2012 [78]. Полученные результаты представлены в Таблица 6.

Таблица 6 — Сравнение опытных значений длительной прочности песчаных и глинистых грунтов на сжатие и сдвиг с рекомендованными значениями R и R_{af} в СП 25.13330.2012 (составлено автором)

Тип Грунта	Кол-во замеров	Температура грунта, °С		Глубина замера, м		σ_c , кПа	R , кПа	σ_s , кПа	R_{af} , кПа	
		от	до	от	до					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Суглинок	нелидистый	21	-0,66	-0,33	19,5	50,5	2430	900-1100	69	40-100
	слабонелидистый	34	-0,70	-0,18	9,5	25,5	1335	800-950	35	40-100
	лидистый	17	-0,36	-0,20	5,4	7,5	707	400-550	19	40-60
Супесь	нелидистая	5	-0,41	-0,15	8,0	19,4	2228	750-1050	114	40-60
	слабонелидистая	19	-0,50	-0,12	9,5	32,0	2179	850-1050	53	40-60
Песок	слабонелидистый пылеватый	14	-0,60	-0,25	10,0	21,5	1963	1000-1800	23	50-130
	слабонелидистый мелкий	32	-0,45	-0,12	9,5	25,4	4584	1000-1700	63	50-80
	слабонелидистый средней крупности	24	-0,16	-0,12	15,4	25,6	6977	1500	171	50

Также для грунтов, охарактеризованных на всех площадках исследований, оценивались величины срыва муфты зонда после смерзания с массивом грунта и выполнялось сравнение с величиной среза по поверхности смерзания со сталью R_{af} , полученные по данным лабораторных испытаний (Таблица 7).

Таблица 7 — Сравнение значений срыва муфты зонда после смерзания с массивом грунта со значениями среза по поверхности смерзания со сталью R_{af} по лабораторным данным (составлено автором)

Наименование грунта	Лаборатория			Статическое зондирование	
	W_{tot} , %	ρ , г/см ³	R_{af} , МПа	количество определений	R_{af} , МПа
Суглинок слабонелидистый	30,7	1,81	0,127	15	0,124
Суглинок лидистый	42,7	1,69	0,078	7	0,093
Супесь нелидистая	19,0	1,97	0,103	2	0,102
Супесь слабонелидистая	25,0	1,88	0,073	6	0,089
Песок пылеватый слабонелидистый,	20,2	1,92	0,093	4	0,100
Песок мелкий слабонелидистый,	21,5	1,86	0,140	9	0,138
Песок средней крупности слабонелидистый,	22,0	1,85	0,189	7	0,197

Анализ полученных результатов выявил следующее:

1. Значения σ_c , полученные по методике автора, получились выше рекомендованных значений R по СП 25.13330.2012 в различной степени: от достаточно близких результатов у слабонелидистого пылеватого песка (1963 и 1000-1800 кПа) до расхождения

в несколько раз — у песка средней крупности (6977 и 1500 кПа). Следует отметить, что данное расхождение может быть объяснено заниженными рекомендуемыми значениями в СП 25.13330.2012 [78]. В подтверждение данного предположения говорят рекомендованные значения R для немерзлого песка средней крупности, приведенные в табл. 7.2 СП 24.13330.2011 [77], которые варьируют от 4000 до 5200 кПа для рассматриваемых в работе глубин погружения нижнего конца сваи. Данные рекомендованные значения для немерзлых песков (4000–5200 кПа) значительно превышают рекомендуемые значения для мерзлых песков (1000–1800 кПа).

2. В целом значения σ_s , полученные по методике автора, (23–171 кПа) и рекомендованные R_{af} по СП 25.13330.2012 (40–130 кПа), в целом оказались достаточно близкими. Так, среднее значение длительной прочности $\bar{\sigma}_s$ песка мелкого укладывается в диапазон значений R_{af} по СП 25.13330.2012 (63 и 50–80 кПа). Значения длительной прочности σ_s для слабльдистого пылеватого песка (23 кПа) и суглинка льдистого (19 кПа) оказались меньше рекомендованных значений R_{af} (50–130 и 40–60 кПа, соответственно). А для супеси нельдистой и песка слабльдистого средней крупности значения σ_s оказались немногим выше рекомендованных значений R_{af} (40–60 и 50 кПа, соответственно).
3. В суглинках и супесях с увеличением льдистости грунта значения σ_c , и σ_s , как и рекомендованные R и R_{af} , снижаются. Данное наблюдение подтверждается теоретическими основами механики мерзлых грунтов, из которых известно, что при увеличении степени льдистости грунта его механические свойства ухудшаются при прочих равных условиях.
4. С увеличением дисперсности грунта значения σ_c , и σ_s , как и рекомендованные R и R_{af} , снижаются. Это подтверждается тем, что при увеличении размеров частиц грунта, при прочих равных условиях, показатели его прочностных свойств повышаются.
5. Значения срыва муфты зонда после смерзания с массивом грунта в момент дополнительного вдавливания зонда показали для разных типов грунтов хорошее совпадение со значениями среза по поверхности смерзания со сталью R_{af} . Однако значения смерзания оказались несколько выше значений длительной прочности на сдвиг σ_s .

Полученные результаты не противоречат теоретическим основам механики мерзлых грунтов и накопленному опыту испытаний несущей способности свай в мерзлых грунтах, обобщенному в СП 25.13330.2012.

5.4 Определение несущей способности свай в мерзлом грунте и сравнение с существующими методиками расчета несущей способности свай

Для проверки разработанной методики для расчета несущей способности сваи в мерзлых грунтах с помощью статического зондирования была выбрана площадка исследований на территории г. Салехард. На данной площадке были выполнены натурные испытания сваи статической нагрузкой. Вблизи испытанной сваи было проведено статическое зондирование в соответствии с разработанной автором методикой. В результате поставлена задача сравнения

получаемых результатов расчета несущей способности свай в мерзлом грунте с фактическими данными по натурным испытаниям свай статической вдавливающей нагрузкой [8, 11].

Натурное испытание свай статической нагрузкой проводилось на железобетонной свае квадратного сечения 300х300 мм. Способ погружения свай — бурозабивной, диаметр лидерной скважины составляет 290 мм. Глубина погружения свай составила 10,6 м. Натурное испытание свай статической вдавливающей нагрузкой проводилось в соответствии с ГОСТ 5686-2012 [72] с применением 10 ступеней нагружения, начиная с 10 тс с выдерживанием каждой ступени не менее 1 суток. По данным полевых испытаний последняя ступень нагрузки на сваю, при которой сохраняется затухающий характер осадки составила $F_n = 55$ тс. Нагрузка, при которой начала развиваться прогрессирующая осадка, составила $F_n = 60$ тс. Далее по методике ГОСТ 20522-2012 [68] рассчитывались значения предельно-длительной несущей способности по формуле:

$$F_n^H = K_t \cdot F_n, \quad (33)$$

где $K_t = 0,65$.

Таким образом, частное значение предельно-длительного сопротивления свай $F_n^H = 35,75$ тс.

Статическое зондирование мерзлого массива грунта, вмещающего сваю, было выполнено в непосредственной близости от испытанной сваи, на расстоянии 2–3 м. Графики записи величин лобового сопротивления и трения грунта по боковой поверхности в процессе движения зонда представлены на рисунке ниже (Рисунок 64). Замеры температуры мерзлых грунтов проводились с помощью статического зондирования и подтвердили наличие мерзлых грунтов на исследуемой площадке. Зондирование было выполнено до глубины 16,0 м ниже дневной поверхности с замерами температуры и релаксации напряжения через 1 м. Испытания проводились в марте 2018 года. На момент проведения испытаний глубина промерзания составила 1,7 м. Ниже, с глубины 3,0 м залегают многолетнемерзлые грунты. Измеренные температуры в толще мерзлого грунта варьируют от $-0,67^\circ\text{C}$ до $-0,12^\circ\text{C}$ (Рисунок 64). Верхняя часть толщи мерзлых грунтов в интервале от 3,0 м до 7,8 м представлена суглинками, ниже, в интервале 7,8–16,0 м залегают пески.

Расчет несущей способности свай производился на основе результатов, обработанных описанными уравнениями длительной прочности для интервалов времени 10 дней и 100 лет. Результаты вычислений представлены в таблицах ниже (Таблица 8, Таблица 9).

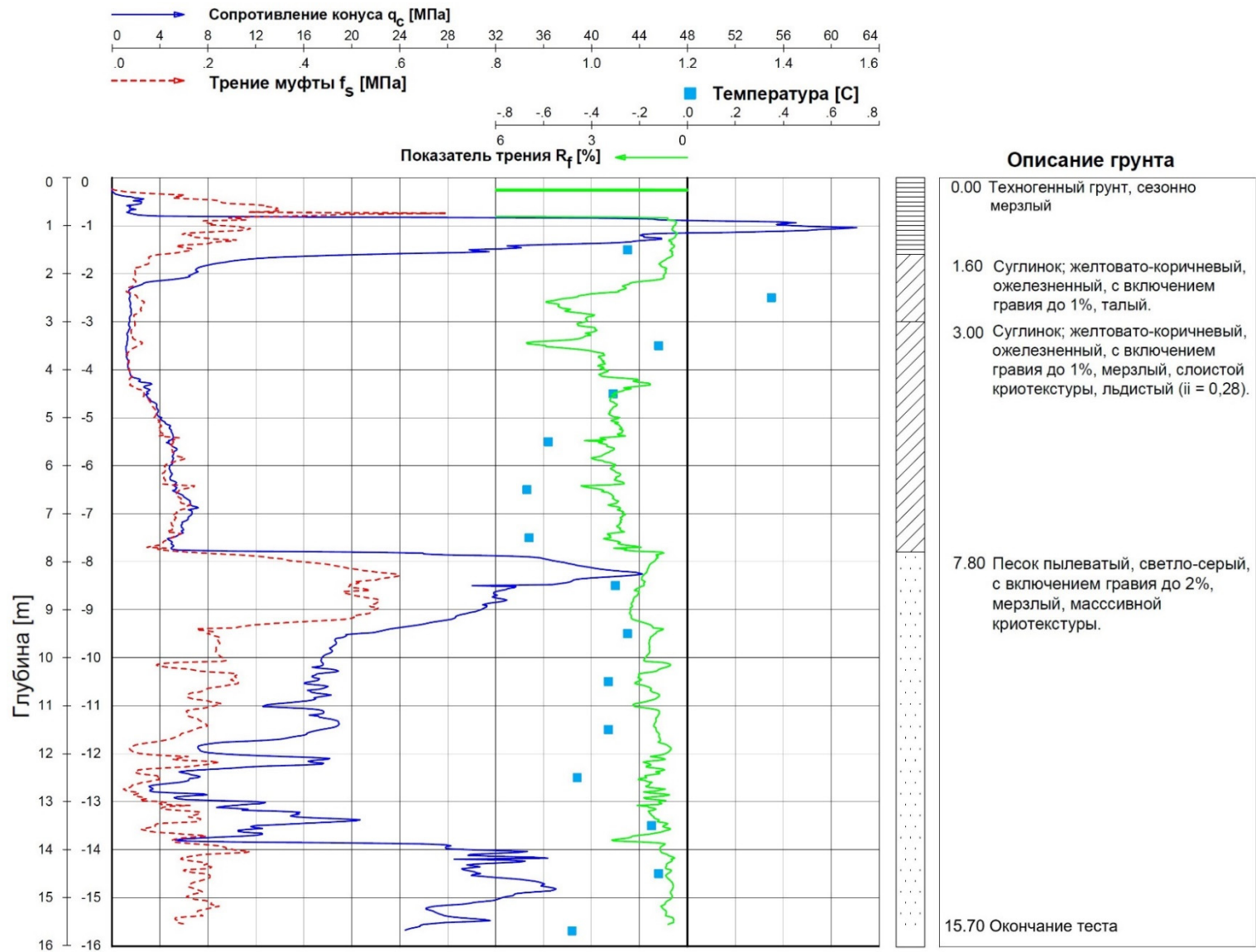


Рисунок 64 — Литологическая колонка четвертичных отложений в г. Салехард, совмещенная с графиком статического зондирования (составлено автором)

Таблица 8 — Значения несущей способности свай, рассчитанные для интервала 10 дней по данным трех уравнений длительной прочности (составлено автором)

Логарифмическое уравнение				Степенное уравнение				Дробно-линейное уравнение			
Глубина, м	Лобовое, кН	Боковое, кН	Общее, кН	Глубина, м	Лобовое, кН	Боковое, кН	Общее, кН	Глубина, м	Лобовое, кН	Боковое, кН	Общее, кН
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2.00	100	20	120	2.00	47	1	48	2.00	40	1	42
3.00	36	37	74	3.00	30	30	60	3.00	32	29	61
4.00	38	42	81	4.00	24	34	58	4.00	41	33	74
5.00	63	46	109	5.00	41	36	77	5.00	59	34	93
6.00	81	65	146	6.00	58	55	113	6.00	69	50	119
7.00	175	70	246	7.00	187	60	246	7.00	104	93	197
8.00	449	123	572	8.00	553	136	689	8.00	205	168	373
9.00	452	166	617	9.00	452	143	595	9.00	304	184	488
10.00	427	197	624	10.00	406	148	554	10.00	344	273	618
11.00	446	217	662	11.00	450	156	606	11.00	402	284	686

Таблица 9 — Значения несущей способности свай, рассчитанные для интервала 100 лет по данным трех уравнений длительной прочности (составлено автором)

Логарифмическое уравнение				Степенное уравнение				Дробно-линейное уравнение			
Глубина, м	Лобовое, кН	Боковое, кН	Общее, кН	Глубина, м	Лобовое, кН	Боковое, кН	Общее, кН	Глубина, м	Лобовое, кН	Боковое, кН	Общее, кН
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2.00	42	1	42	2.00	35	1	36	2.00	26	1	27
3.00	27	13	40	3.00	19	26	45	3.00	23	12	35
4.00	26	15	41	4.00	8	27	35	4.00	36	15	51
5.00	42	18	60	5.00	13	27	41	5.00	50	15	65
6.00	55	29	84	6.00	22	34	56	6.00	53	23	75
7.00	111	32	144	7.00	72	37	109	7.00	79	58	138
8.00	260	68	328	8.00	189	101	290	8.00	187	117	303
9.00	271	90	361	9.00	153	101	255	9.00	282	133	415
10.00	275	106	381	10.00	176	102	278	10.00	279	222	501
11.00	292	117	409	11.00	220	102	322	11.00	342	233	574

Полученные результаты коррелируют друг с другом. Видно, что несущая способность забивной сваи длиной 10–11 м в мерзлом грунте при интервале времени 10 дней составляет порядка 62–66 т, а срыв сваи произошел при ступени нагрузки, приблизительно на 5% меньшей, и составившей 60 т. В свою очередь, рассчитанная несущая способность этой сваи при интервале времени 100 лет составляет от 38 до 41 т, а расчетное частное значение предельно-длительного сопротивления сваи составляет около 36 т, что лишь на 8% меньше, чем значение, рассчитанное на основе данных полевого испытания мерзлых грунтов статическим зондированием. Наблюдаемое различие полученных результатов может быть объяснено неоднородностью грунтового массива.

В свою очередь степенное и дробно-линейное уравнения показывают худшие результаты по сравнению с логарифмическим уравнением. Степенное уравнение занижает результат (28–32 т), а дробно-линейное завышает (50–57 т). Как видно, реология мерзлого грунта проявляется с течением времени и при длительном воздействии нагрузки свая имеет меньшую несущую способность. Это критически важно учитывать при проектировании высоконагруженных свайных фундаментов. Автором подтвержден вывод С.С. Вялова о том, что логарифмическое уравнение наиболее точно описывает процесс релаксации напряжения в мерзлых грунтах.

5.5 Сравнение расчета несущей способности сваи с результатами испытания натурной сваи статической нагрузкой

Результаты, полученные на площадке сравнительных исследований на территории г. Салехард, показывают, что значения несущей способности забивной сваи, рассчитанные с помощью предлагаемой автором методики гораздо ближе к результатам натурального испытания сваи статической нагрузкой, чем с методикой, разработанной О.Н. Исаевым, изложенной в СП 25.13330.2012 Приложение Л [78] (Рисунок 65).

Преимущество разработанной автором методики состоит в том, что:

1. Прямой расчет, не использующий поправочных или/и эмпирических коэффициентов;
2. Проведение расчета длительной несущей способности сваи на любой заданный промежуток времени – от 1 дня до 100 лет.

Используя вышеперечисленные преимущества методики, автором были рассчитаны значения несущей способности сваи как на 10 дней – для прямого сравнения с натурным испытанием сваи, так и на 100 лет – для сравнения с предельно-длительными расчетными значениями как по ГОСТ 5686-2012 [72], так и по СП 25.13330.2012 [78].

Сравнительный анализ результатов показал, что для расчет несущей способности сваи на 10 дней $F_u = 66$ т хорошо соотносится с результатами несущей способности сваи по ГОСТ 5686-2012 [72], в ходе которого производилась ступенчатая нагрузка в течение 10 дней, и при нагрузке в 60 т (на 10-й день) наблюдалась незатухающая деформация.

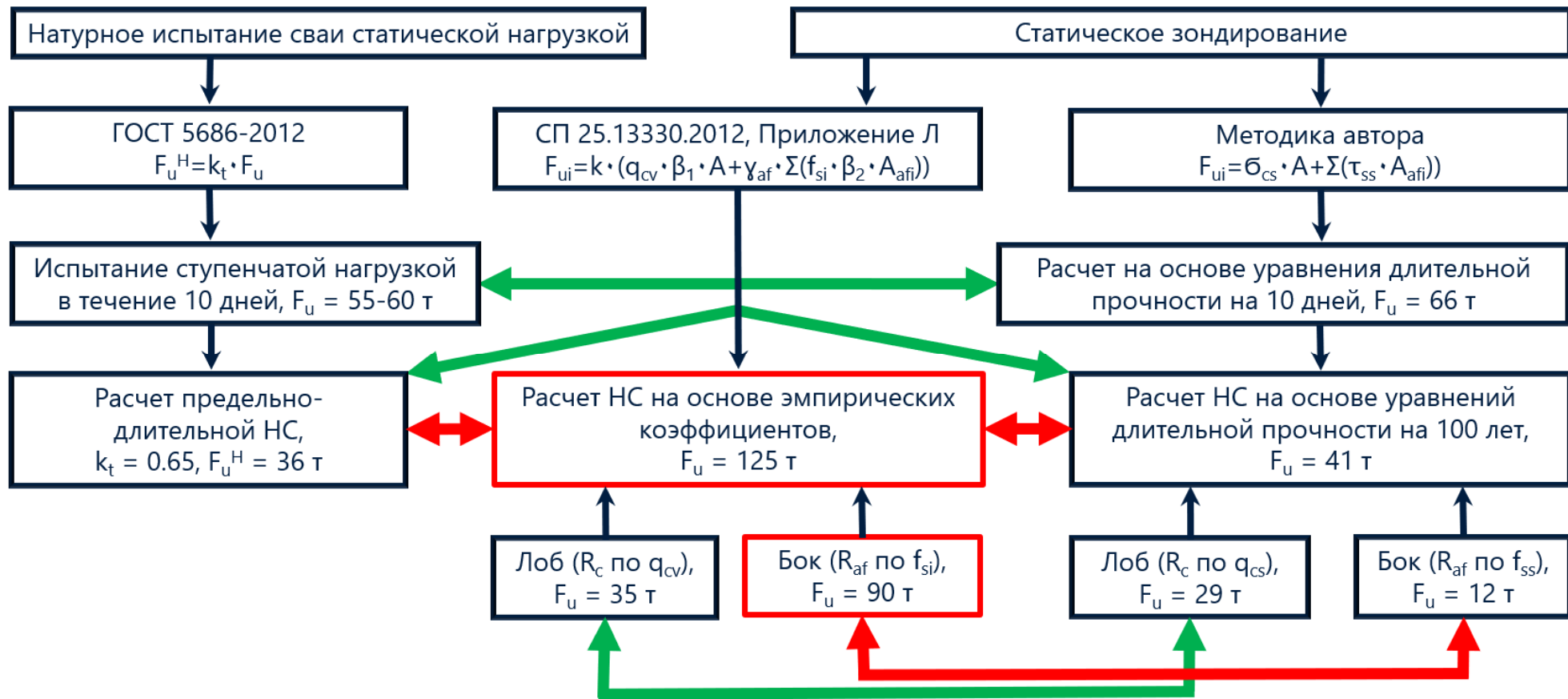


Рисунок 65 — Сравнение расчетных методов по статическому зондированию с натурным испытанием сваи статической нагрузкой (составлено автором)

Расчет на основе уравнений длительной прочности для 100 лет по данным статического зондирования показал результат $F_u = 41$ т, что также хорошо коррелирует с результатами расчета предельно-длительной несущей способности сваи по ГОСТ 5686-2012 [72], который составляет $F_u^H = 36$ т. В свою очередь, расчет по СП 25.13330.2012 Приложение Л [78] предельно-длительной несущей способности сваи показал результат в 125 т, что более чем в 3 раза превышает значение $F_u^H = 36$ т, полученное по ГОСТ 5686-2012 [72].

Автором был проведен подробный анализ, на предмет выявления ошибки. Для этого были сопоставлены отдельно рассчитанные значения по лобовому сопротивлению и боковому трению, что соответствует значениям давления под нижним концом сваи и сопротивлению сваи вдоль поверхности смерзания. В результате сравнения видно, что рассчитанные значения по статическому зондированию для давления под нижним концом сваи R_c достаточно близки друг к другу (35 т и 29 т), а рассчитанные значения сопротивления сваи вдоль поверхности смерзания R_{af} существенно различаются. Так по методике СП 25.13330.2012 [78] R_{af} составило 90 т, по разработанной автором методике — 12 т. Данное различие показывает, что ошибка в расчетной методике СП 25.13330.2012 [78] заложена в оценке предельно длительного сопротивления мерзлого грунта сдвигу по боковой поверхности смерзания сваи.

Для сравнения автором было проанализировано более ранние работы по этой теме. Так в публикации [32] предлагается вести расчет на основе эмпирических коэффициентов, учитывающих не только коэффициент надежности, но и влияние недостаточно подробно изученных эффектов, возникающих в грунте при внедрении зонда [48]. Для расчета составляющей под нижним концом сваи предлагается воспользоваться коэффициентом релаксации K_p равным 0,42, полученным для суглинков. K_p равен отношению q_3 (50 лет) / q_3 (5 мин). Рассчитанные по этой формуле значения K_p для рассматриваемых испытаний оказались достаточно близки к данным в работе О.Н. Исаева, но только для суглинков, где K_p изменялся от 0,31 до 0,52 при среднем значении 0,42. Однако для песков K_p изменялся от 0,37 до 0,11 при среднем значении 0,27. Однако, сравнить полученные в работе О.Н. Исаева эмпирические коэффициенты для бокового трения не представилось возможным, поскольку они не приведены в работе [32].

В настоящее время повышение точности измерений, выполняемых при статическом зондировании, позволяет проводить определения предельного сопротивления мерзлого грунта вдоль боковой поверхности сваи. Предложенный автором алгоритм обработки «хвоста» кривой позволяет точно и однозначно рассчитать необходимые значения предельно длительного сопротивления мерзлого грунта сдвигу по боковой поверхности смерзания сваи. Таким образом, впервые удалось решить задачу прямого расчета несущей способности сваи на основе результатов испытаний статическим зондированием.

Выводы

1. Установлено, что существующая методика, приведенная в СП 25.13330.2012 [78], для расчета несущей способности свай по результатам статического зондирования осложнена избыточным количеством эмпирических коэффициентов, что ведет к увеличению вероятности ошибки в расчете.
2. Показано, что разработанная методика, основанная на подходе, реализованном в динамометрическом методе С.С. Вялова, позволяет определить длительную прочность по результатам измерения релаксации напряжений с необходимой для расчета несущей способности свай точностью. На основе полученных результатов определения длительной прочности грунтов представляется возможным выполнить прямой расчет несущей способности свай без использования дополнительных эмпирических коэффициентов.
3. Выполнено сравнение значений несущей способности натурной сваи, полученных по результатам полевого испытания сваи статической вдавливающей нагрузкой в течение 10 дней, с результатами расчета по методикам СП 25.13330.2012 и разработанной методики. Сравнение показало, что расчет по СП 25.13330.2012 дает существенно более высокие значения несущей способности, особенно в части бокового трения поверхности сваи о грунт. Расчет по разработанной методике позволяет получить результаты, которые хорошо совпадают с результатами испытаний натуральных свай статической вдавливающей нагрузкой.

ГЛАВА 6. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

6.1 Оценка эффективности работы термостабилизаторов по данным статического зондирования

В разделе рассматривается применение статического зондирования для диагностики состояния грунтового основания под Ямальским полярным агроэкономическим техникумом с помощью статического зондирования. Здание техникума построено в 1977 г., 2 этажа, имеет свайный фундамент. Сваи длиной 8–10 м объединены железобетонным сплошным ростверком. В середине 2010-х начала происходить неравномерная осадка сооружения, в результате чего юго-восточный край сооружения отсел и произошел разрыв внешних стен. Эксплуатация здания была приостановлена. Внутри здания развивались деформационные трещины (Рисунок 67), за которыми был установлен мониторинг. Здание было усилено с помощью крепления стальных уголков (Рисунок 66).



Рисунок 66 — Неравномерная осадка здания Ямальского полярного агроэкономического техникума (фото автора)

В 2014 г. в ходе инженерно-геологических изысканий было предположено, что осадка сооружения произошла в результате оттаивания мерзлых грунтов в основании здания до глубины 8 м. Несущая способность свай по данным 2014 года составляла 11 т. Оценка проводилась по таблицам СНиПа, и составляет вдвое меньше проектной. Проектная нагрузка на сваю составляет 20 т.

После был выполнен комплекс работ по укреплению сооружения и грунтов основания под ним. Для восстановления температурного режима грунтов основания по периметру сооружения, напротив свай, были смонтированы алюминиевые термостабилизаторы длиной 8 м и диаметром 25 мм. К декабрю 2016 г. термостабилизаторы отработали 1 полный зимний цикл.



Рисунок 67 — Трещина во внешней стене здания Ямальского полярного агроэкономического техникума (фото автора)

В декабре 2016 года автором были проведены работы с помощью статического зондирования для контроля качества работы термостабилизаторов и диагностике мерзлого грунтового основания под Ямальским полярным агроэкономическим техникумом [50]. Сбор полевых данных проводился в декабре 2016 г. Температура воздуха на площадке в данный период менялась от -20°C до -26°C . Общее количество точек статического зондирования — три, максимальная глубина зондирования — 12,1 м. Расположение точек определялись исходя из рекогносцировочного обследования сооружения и расположения свай фундамента и термостабилизаторов (Рисунок 68).

Статическое зондирование выполнялось с помощью мобильной установки с максимальным усилием вдавливания 100 кН (Рисунок 69). Места выполнения зондирования были выбраны на разном удалении от термостабилизаторов для получения контрастной картины их воздействия на окружающие грунты.

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

В пределах выделенного участка на исследуемой площадке высота проветриваемого подполья изменялась от 1,90 до 2,20 м. Несмотря на стесненные по высоте условия

использование малогабаритной установки позволило без дополнительных мероприятий выполнить зондирование. Реакция для вдавливания зонда создавалась опиранием задавливающего устройства в несущие конструкции сооружения.

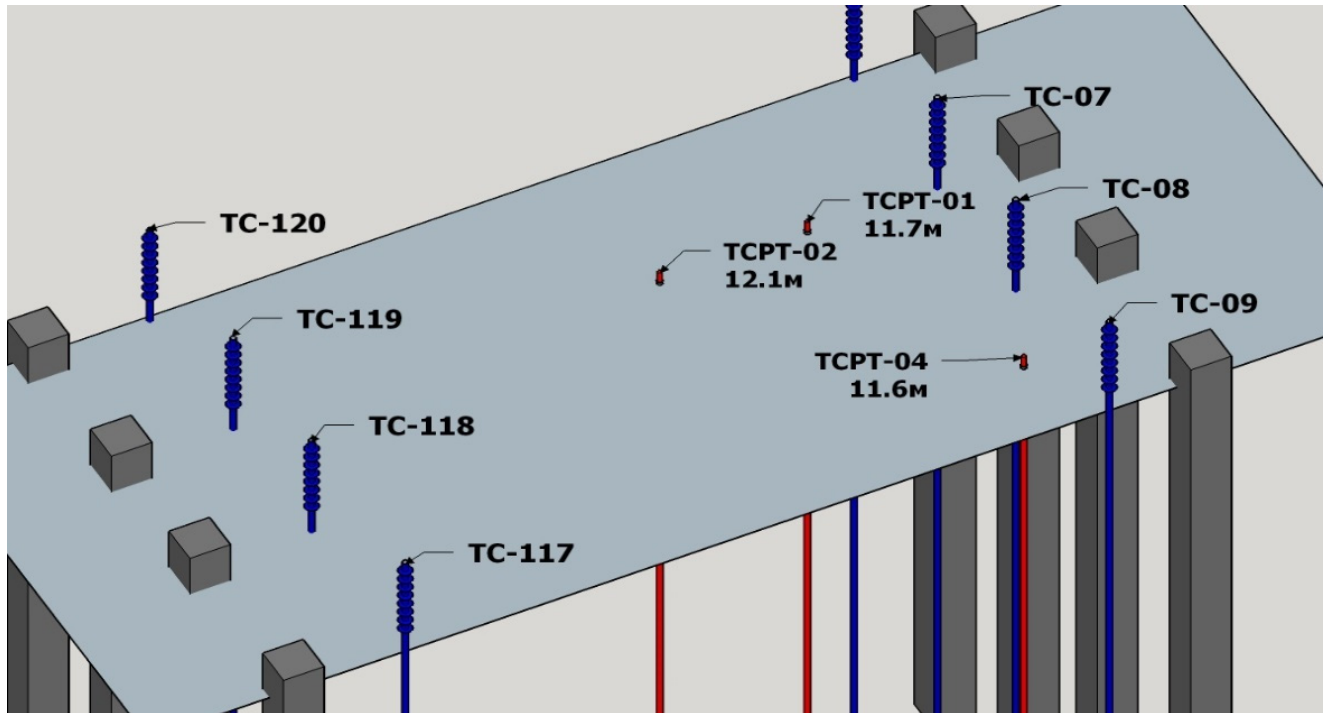


Рисунок 68 — Расположение точек статического зондирования (ТСРТ), термостабилизаторов (ТС) и свай [50]



Рисунок 69 — Мобильная установка статического зондирования во время испытания ТСРТ-04 (фото автора)

Для оценки эффективности работы термостабилизаторов зондирование проводилось ниже глубины их установки (8 м), в частности до 11,6 и 12,1 м (Рисунок 68). Задавливание конуса велось с постоянной скоростью 2 см/с, и измерением следующих параметров:

q_c , МПа — лобовое сопротивление или удельное сопротивление грунта под конусом зонда;

f_s , кПа — боковое трение или удельное сопротивление грунта на муфте трения зонда;

T , °С — температура.

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 и охлажденных 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 плотностью. Полевые испытания ММГ статическим зондированием в комплексе с инженерно-геологическим бурением позволили провести выделение инженерно-геологических элементов. На основе данных, полученных с помощью статического зондирования на площадке исследования, и данных инженерно-геологического бурения, выполненного ранее в 2014 г., было выделено 5 ИГЭ (Рисунок 70).

Это отчетливо видно на графике статического зондирования в точке ТСРТ-01. В разрезе до глубины 11,5 метров выделяется 5 инженерно-геологических элементов.

ИГЭ 1 — Песок техногенный, мелкий с примесью супеси, температура колеблется в интервале $-12,5 \div -1,2$ °С, показывает лобовое сопротивление до 25-30 МПа, трение по боковой поверхности также высокое и составляет 0,3 – 0,5 МПа.

ИГЭ 2 — Суглинок с прослоями 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 $+0,1$ °С и низкими показателями лобового сопротивления — 2–4 МПа; трения по боковой поверхности — $0,05 \div 0,1$ МПа. В нижней части, при переходе этого грунта в мерзлое состояние наблюдается существенное увеличение этих показателей: температура снижается до $-0,5 \div -1,3$ °С 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» конфигурацию.

ИГЭ 3 — Суглинок желтовато-серый с прослоями 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 выраженными «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.

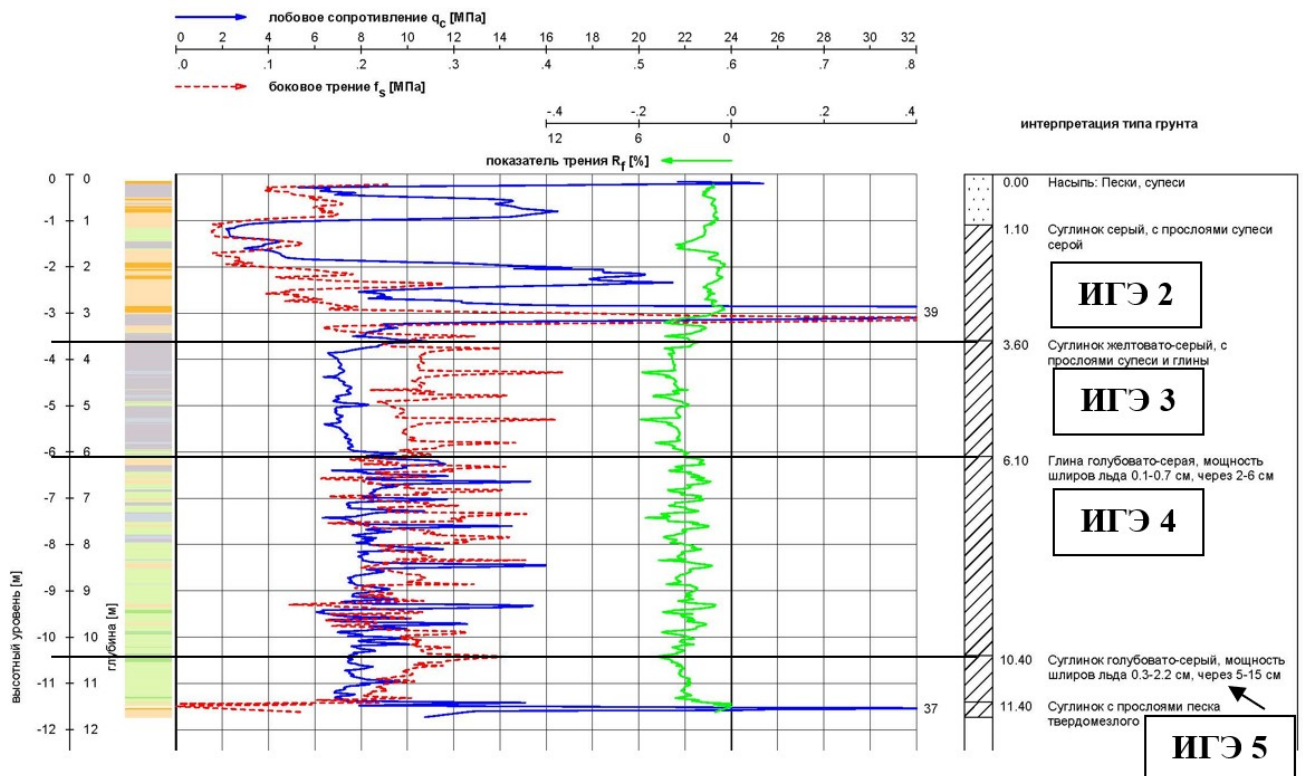


Рисунок 70 — Выделение ИГЭ на основе данных по статическому зондированию и бурению

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.

ИГЭ-03 представлен желтовато-серым суглинком, по данным бурения содержит прослойки 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).

В ходе испытаний на площадке Ямальского полярного агроэкономического техникума выполнялось прерывистое задавливание с остановками для замера температуры грунта, как по экспресс-методике [64], так и по методике температурной стабилизации [9, 80].

Было измерено, что на глубине первых метров температура грунта составила до $-8,9^{\circ}\text{C}$, поскольку замер производился в начале декабря и температура воздуха в течение недели изменялась в пределах от -20 до -30°C . Грунт на такой глубине обычно не принимается в расчет, что и было сделано в данных исследованиях, однако это важно для понимания задавливающих возможностей оборудования и величин измеряемых показателей зондирования. Более подробно об этом будет изложено дальше.

Рисунок 71 иллюстрирует взаимное расположение свай, термостабилизаторов и точек статического зондирования. На графиках замера температуры (Рисунок 72) в точках зондирования видно воздействие термостабилизатора на окружающий грунт, в точке ТСРТ-02, находящейся на расстоянии 2,1 м от стабилизатора температурного поля нет, это «фоновые», естественные значения температур [50].

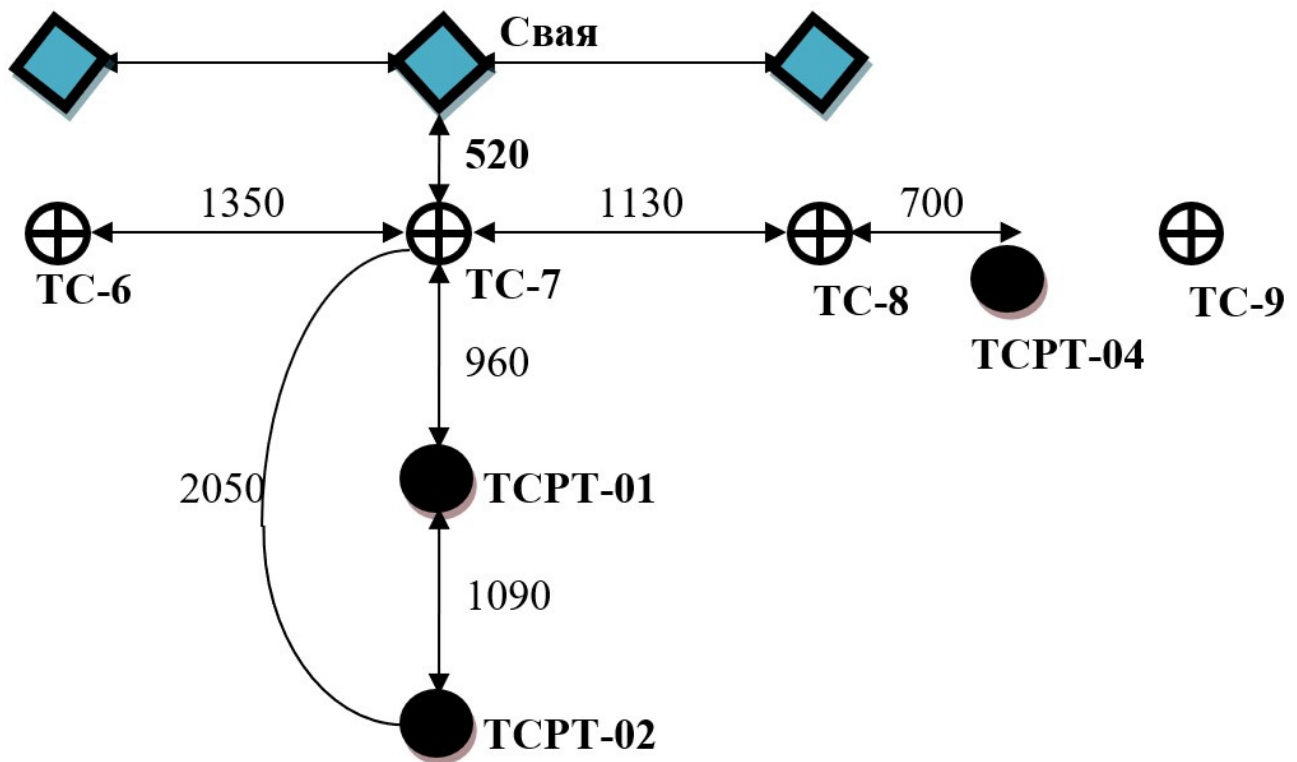


Рисунок 71 — Схема расположения свай, термостабилизаторов (ТС) и точек статического зондирования (ТСРТ)

Далее, по мере приближения к стабилизатору видно его температурное поле. Так в точке ТСРТ-01 — 1,0 м от стабилизатора температура грунтов заметно ниже, а в точке ТСРТ-04 — 0,7 м от стабилизатора, замеренная температура самая низкая, что говорит о существенном охлаждающем эффекте от стабилизатора.

Анализ полученных температурных значений (Таблица 10) показывает, что на глубине 2–3 м температура грунтов составляет $-0,5 \div -1,0^{\circ}\text{C}$. Далее по глубине в фоновой точке ТСРТ-02 температура грунтов изменяется в пределах $-1,0 \div -1,28^{\circ}\text{C}$, достигая своего минимума на глубине 6,1 м. В точке ТСРТ-01 наблюдается небольшое понижение температуры по сравнению с фоновой точкой ТСРТ-02, и температура грунтов изменяется в пределах $-1,0 \div -1,4^{\circ}\text{C}$, достигая своего минимума на глубине 5,2 м в $-1,4^{\circ}\text{C}$.

Наибольшее понижение температуры грунтов было замерено в точке ТСРТ-04, которая расположена наиболее близко к термостабилизаторам, на расстоянии 0,7 м от ТС-8 и ТС-9. Так на глубине 5,9 м температура мерзлых грунтов достигла $-2,04^{\circ}\text{C}$. Такое понижение температуры грунтов также обусловлено расположением точки ТСРТ-04, где встречаются радиальные тепловые потоки, направленные к двум термостабилизаторам.

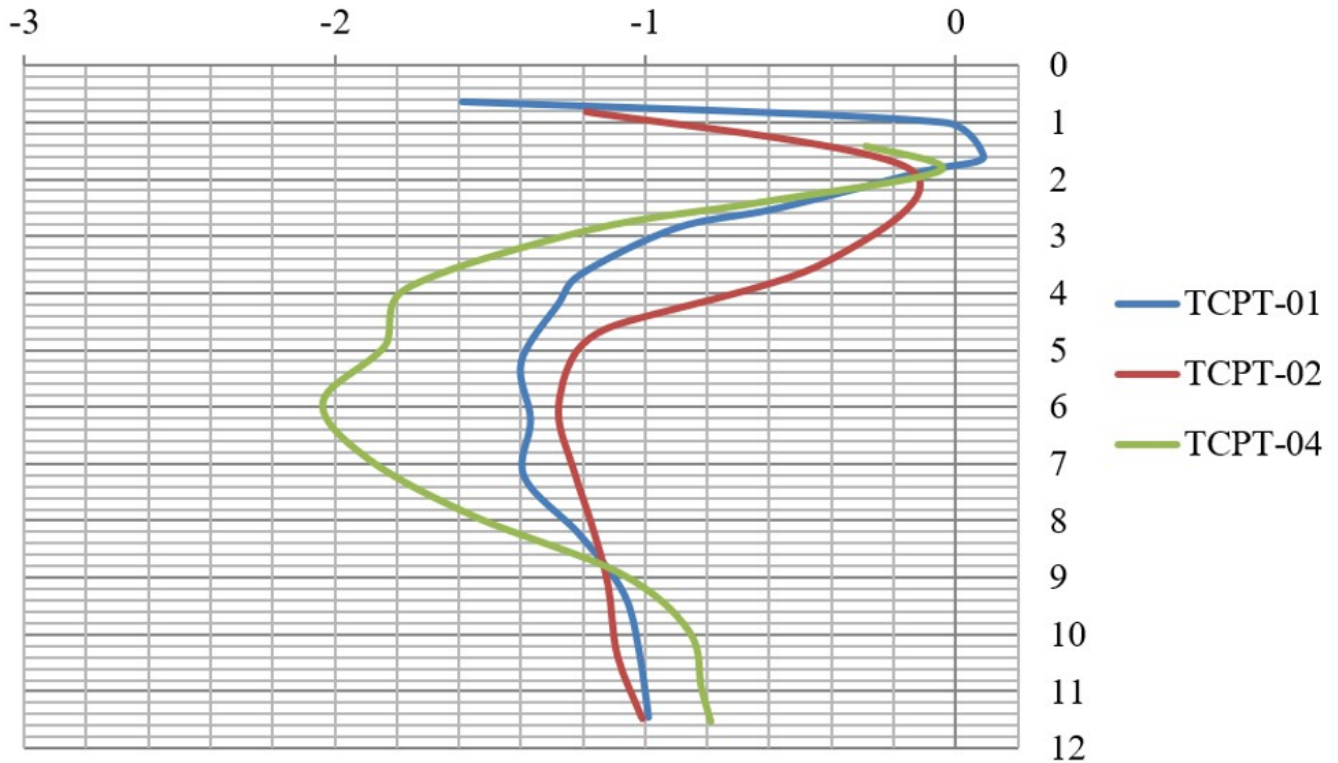


Рисунок 72 — Замеренная температура грунтов в точках ТСРТ-01, ТСРТ-02 и ТСРТ-04.

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

Возможно, понижение температуры мерзлых грунтов на $-0,76^{\circ}\text{C}$ может показаться незначительным. Однако, это дает существенное увеличение значений показателей механических свойств мерзлых грунтов.

В настоящее время на площадке учебного заведения развернута сеть температурного мониторинга и оборудована онлайн интерфейсом для записи изменения температуры грунтов в реальном времени. Также продолжают наблюдения за режимом работы термостабилизаторов и в качестве отправной точки начала наблюдений положена температура, замеренная в ходе полевых испытаний грунтов зондированием.

Таблица 10 — Замеренная температура грунтов в точках ТСРТ-01, ТСРТ-02 и ТСРТ-04 (составлено автором)

ТСРТ-01		ТСРТ-02		ТСРТ-04	
Глубина от поверхности, м	Температура а, °С	Глубина от поверхности, м	Температура, °С	Глубина от поверхности, м	Температура а, °С
0.11	-9.73	0.34	-7.08	0.42	-12.56
0.64	-1.59	0.82	-1.19	0.91	-4.63
1.01	-0.03	1.82	-0.15	1.42	-0.29
1.62	0.09	3.47	-0.42	1.85	-0.05
1.86	-0.1	4.6	-1.11	2.4	-0.62
2.51	-0.57	5.1	-1.23	2.89	-1.18
2.86	-0.9	6.11	-1.28	3.92	-1.77
3.68	-1.21	7.13	-1.23	4.93	-1.84
4.19	-1.28	8.13	-1.17	5.92	-2.04
5.21	-1.4	9.14	-1.12	6.93	-1.89
6.23	-1.37	10.38	-1.09	7.93	-1.55
7.24	-1.39	11.49	-1.01	8.93	-1.08
8.26	-1.21			9.94	-0.86
9.28	-1.07			10.93	-0.82
11.46	-0.99				

Сравнение измеренных данных по лобовому сопротивлению, боковому трению и температуре. Для более детального анализа характеристик грунтов были 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 выделить построить графики изменения температуры, лобового сопротивления и бокового трения по глубине для ИГЭ-03 и ИГЭ-04) (Рисунок 73, Рисунок 74). 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 интересующий нас эффект.

Видно, что с понижением температуры возрастает лобовое сопротивление и боковое трение (Рисунок 73, Рисунок 74). Причем в точке испытаний ТСРТ-04 температура достигала наиболее низких значений из-за наиболее близкого расположения к термостабилизаторам, что также отразилось на более высоких значениях лобового сопротивления и бокового трения.

Расчет несущей способности сваи в температурном поле термостабилизаторов производился в соответствии с методиками:

1. изложенной в СП 25.13330.2012 Приложения Л [78],
2. разработанной автором, описанной в Главе 4.

Исходные данные для расчета взяты из проектных материалов. Тип сваи — забивная железобетонная. Сечение сваи 300x300 мм. Для выполнения расчетов была проведена интерпретация данных статического зондирования для определения типа грунта мерзлое или талое. В расчете не учитывались первые три метра грунтового разреза, так как практика расчетов обычно исключает деятельный слой (насыпной грунт, слой сезонного промерзания/оттаивания).

Расчет несущей способности забивной сваи в соответствии с СП 25.13330.2012 Приложением Л [78], проведенный по данным статического зондирования (Таблица 11), показал, что забивная свая 300x300 мм длиной 8 м в грунтовых условиях, неохлажденных термостабилизаторами, имеет несущую способность 53 т (ТСРТ-02), а в охлажденных условиях 62 т (ТСРТ-01) и 77 т (ТСРТ-04). В относительных величинах увеличение несущей способности сваи составило 17% (ТСРТ-01) и 45% (ТСРТ-04). Стоит отметить, что расчет был выполнен на всю глубину испытаний и на глубине 11 м соотношение значений несущей способности сваи для трех точек испытаний составило 16% (ТСРТ-01) и 42% (ТСРТ-04). Уменьшение этих значений может быть объяснено двумя факторами: неоднородностью грунта и ослаблением охлаждающего воздействия термостабилизаторов с глубиной.

Расчет несущей способности сваи по разработанной методике показал качественно схожий результат. Так видно, что при увеличении охлаждения грунтового массива вокруг термостабилизатора, несущая способность возрастает на 10% и 22% соответственно для точек ТСРТ-01 и ТСРТ-04. Это несколько меньшие значения, чем результаты обработки по СП. В целом они также подтверждают, что на данном примере охлаждение грунта приводит к несколько меньшему, но повышению несущей способности сваи. Однако, при количественном сравнении наблюдается более существенное различие между результатами расчета. Так несущая способность сваи, расположенной вне зоны действия термостабилизатора, по методике СП составляет 53 т, а по разработанной методике — 32 т, а в точке ТСРТ-04 — 77 т и 39 т, соответственно.

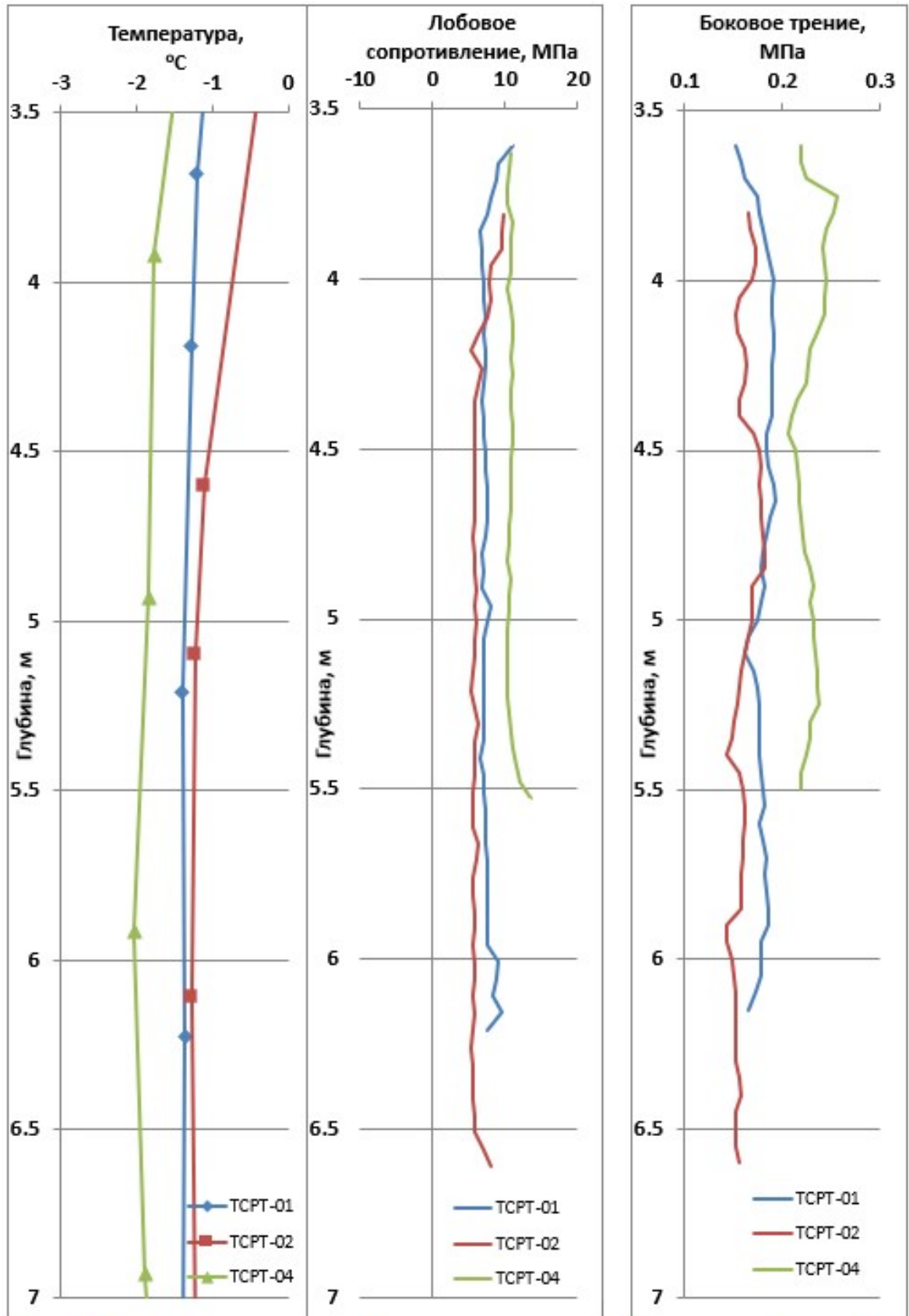


Рисунок 73 — Зависимость температуры, лобового сопротивления q_c и бокового трения f_s от глубины для глинистого грунта, слабльдистого (ИГЭ-03)

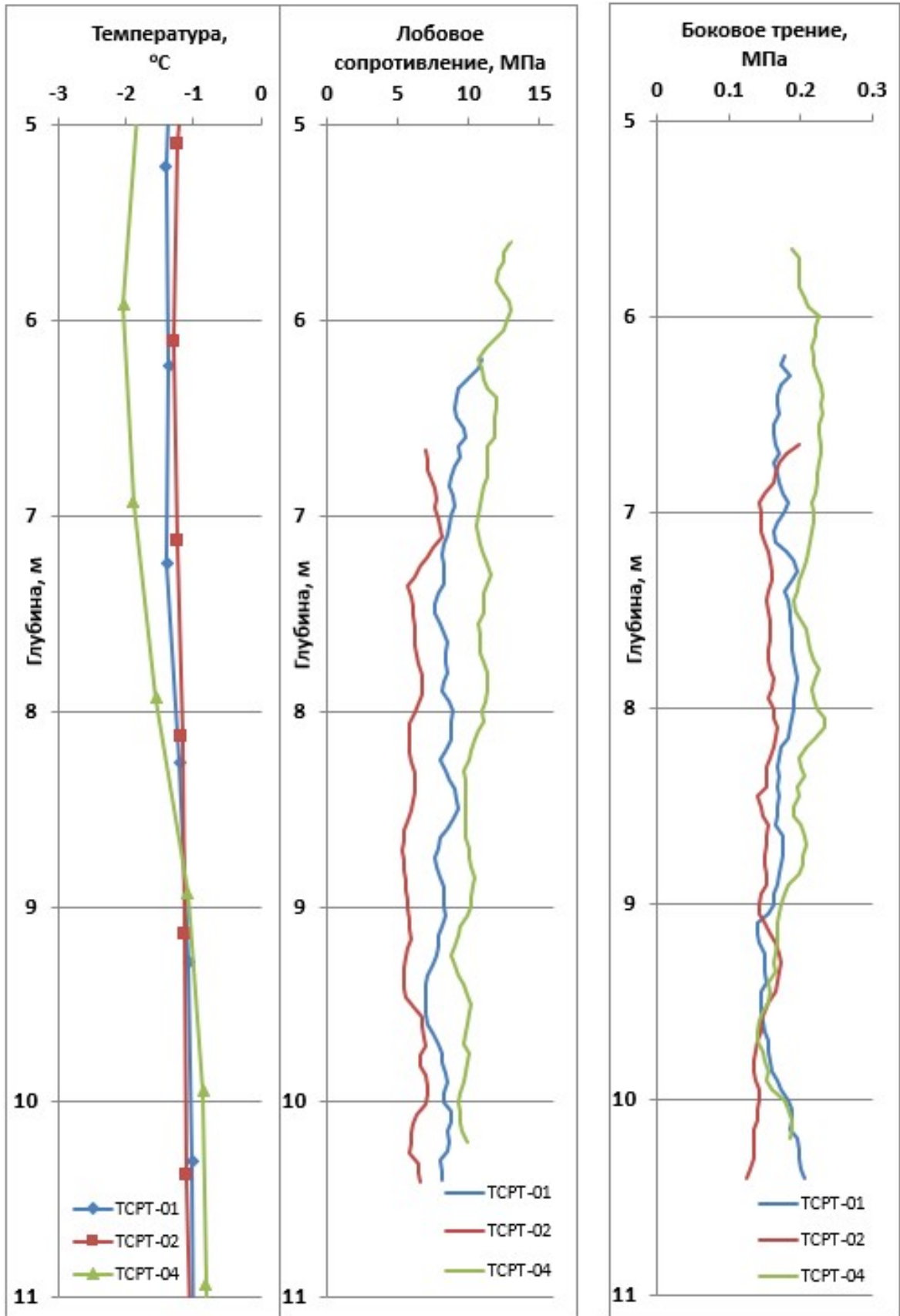


Рисунок 74 — Зависимость температуры, лобового сопротивления q_c и бокового трения f_s от глубины для глинистого грунта, льдистого (ИГЭ-04)

Таблица 11 — Результаты расчета несущей способности сваи по различным методикам (составлено автором)

Глубина, м	СП 25.13330.2012 Прил. Л.			Разработанная методика		
	ТСРТ-01	ТСРТ-02	ТСРТ-04	ТСРТ-01	ТСРТ-02	ТСРТ-04
4	28	30	36	12	14	17
5	37	34	48	23	18	23
6	46	41	58	32	26	29
7	53	48	69	35	32	36
8	62	53	77	35	32	39
9	69	59	86	39	35	39
10	75	66	92	42	37	45
11	87	75	107	44	38	51
	+16%		+42%	+15%		+32%

Данное расхождение в расчетах (почти в 2 раза) большое и требует проверки с помощью референсного испытания – натурного испытания сваи статической нагрузкой. Однако в проветриваемом подполье выполнить данное испытание не представлялось возможным. Позже для этого автором была выбрана площадка на территории г. Салехарда, на которой выполнялись натурные испытания сваи статической нагрузкой. Появилась возможность выполнить статическое зондирование для сравнения получаемых результатов по несущей способности сваи. Результаты подробного анализа и сравнения приведены в подразделе 5.4.

В целом проведенными испытаниями 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, независимо от методики обработки данных статического зондирования, 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 существенному увеличению несущей способности сваи по сравнению с фоновым значением.

Результатом проведенных исследований с помощью статического зондирования было установление факта, что осадка юго-восточного крыла сооружения была вызвана не оттаиванием мерзлоты, а другими причинами. Здание Ямальского полярного агроэкономического техникума было решено вывести из эксплуатации.

6.2 Диагностика состояния мерзлого грунтового основания

Северная железная дорога является транспортной системой, связывающей северные регионы России с ее Европейской частью. Дорога построена в 1940-е годы и на сегодняшний день является единственной крупной транспортной артерией Севера. Железная дорога соединяет города Воркута, Лабитнанги и поселок Бованенково с Европейской частью России. Перспективой развития этой транспортной системы представляется строительство продолжения железной дороги в северном направлении для подключения порта Сабетта на полуострове Ямал, а также проект Северного Широтногохода, магистрали, обеспечивающей грузопоток вдоль Северного Морского Пути. На сегодня загрузка железной дороги грузовым потоком составляет около 30% от проектной мощности. Основным видом деятельности является перевозка угля, а также доставка пассажиров и грузов различного назначения в города Воркута, Лабитнанги и Салехард. Невозможность увеличения грузопотока в первую очередь связана с продолжающимися деформациями пути и земляного полотна в результате техногенного воздействия на ММГ и сопутствующую ей деградацию мерзлоты (Рисунок 75).



Рисунок 75 — Деформации железнодорожного полотна (фото автора)

Столь низкая грузовая загруженность дороги и как следствие недостаток изученности факторов, вызывающих деформации, не позволяет провести масштабную и эффективную работу по устранению причин деформаций. На сегодня единственным применяемым решением служит периодическая подсыпка балластного материала в зонах просадок. Отсутствуют инженерные данные о реальных причинах этих деформаций и как следствие отсутствует возможность принятия правильного решения по мерам устранения деформаций железнодорожного полотна.

В ходе инженерно-геокриологической практики МГУ им. М.В. Ломоносова, при участии автора, в качестве испытательного полигона был выбран участок Северной железной дороги близ станции Полярный Урал [95]. Железнодорожная насыпь варьирует по мощности от 2 до 6 м от уровня естественного рельефа. По обеим сторонам трассы железной дороги наблюдаются проявления термокарста и заболоченности в виде небольших озер и низменностей. Поверхностные и подземные воды свободно протекают через железнодорожную насыпь, особенно вблизи водопропускной трубы. Профиль в месте установки водопропускной трубы на расстоянии 5 метров от железнодорожных путей выглядит следующим образом: 1,5 м щебня,

затем 1 м песчаной смеси с остатками почвенно-растительного слоя и строительными отходами; коренные грунты - серо-коричневый суглинок - встречается ниже отметки 2,5 м. Кровля мерзлого грунта картирована на основе статического зондирования на глубине 1,5–1,7 м. Технологически невозможно было обнаружить кровлю вечной мерзлоты прямо под водопропускной трубой. Бурение скважин на железной дороге в процессе эксплуатации нецелесообразно. Наземный георадар не обнаружил кровлю вечной мерзлоты, показав только оттаявшие слои грунта до отметки 4 метра. Геодезическая съемка показала, что общая осадка насыпи железнодорожного полотна составляет 62 см. Периодическое выравнивание железнодорожной насыпи гравийной отсыпкой осуществлялось для поддержания железной дороги в рабочем состоянии.

Поставленная задача состояла в том, чтобы применить новую методику, которая способна диагностировать и / или подтвердить проблему, точно описать масштаб проблемы и предоставить достаточно информации, чтобы найти выполнимое техническое решение.

При исследовании грунтов в зоне распространения вечной мерзлоты возникают затруднения в части корректной оценки прочностных и температурных характеристик грунтов. Стандартными методами исследований свойств грунтов являются бурение и лабораторные испытания. Однако, зачастую бурение может быть сильно затруднено в части точного определения состояния грунтов, находящихся близко к температуре начала замерзания и грунтов, находящихся при около нулевой положительной температуре. Этот аспект также не позволяет провести отбор качественных образцов грунта для определения прочностных и деформационных характеристик грунтов. Таким образом, в условиях высоких отрицательных температур грунта на первое место должны ставиться полевые методы исследований, в первую очередь статическое зондирование с измерением температуры. Статическое зондирование позволяет быстро оценить прочность грунта в массиве, быстро и точно замерить температуру, провести расчленение разреза по глубине, что позволяет повысить точность интерпретации геофизических данных.

На этапе контроля состояния железнодорожной насыпи и грунтов основания специальный измерительный комплекс проводит в том числе и геофизические исследования грунтов методами электроразведки, размещение на том же комплексе установки статического зондирования позволяет точно установить нижнюю границу насыпного грунта, выделить температурные зоны грунтов при положительной и отрицательной температурах, провести оценку прочностных характеристик грунтов природного и техногенного генезиса.

Для решения такой задачи было применено статическое зондирование непосредственно от верхушки железнодорожной насыпи без разборки шпальной решетки с использованием специализированной установки, смонтированной на путеизмерительный состав (Рисунок 76) [95].

При исследовании мерзлых грунтов статическое зондирование позволяет косвенно оценить модуль деформации (E_f , МПа), эквивалентное сцепление (C_{eq} , кПа) (т.е. прочность) и несущую способность сваи (F_u , кН) в соответствии с рекомендациями СП 25.13330.2012 [78].



Рисунок 76 — Установка статического зондирования (монопод) на платформе путеизмерительного состава (фото автора)

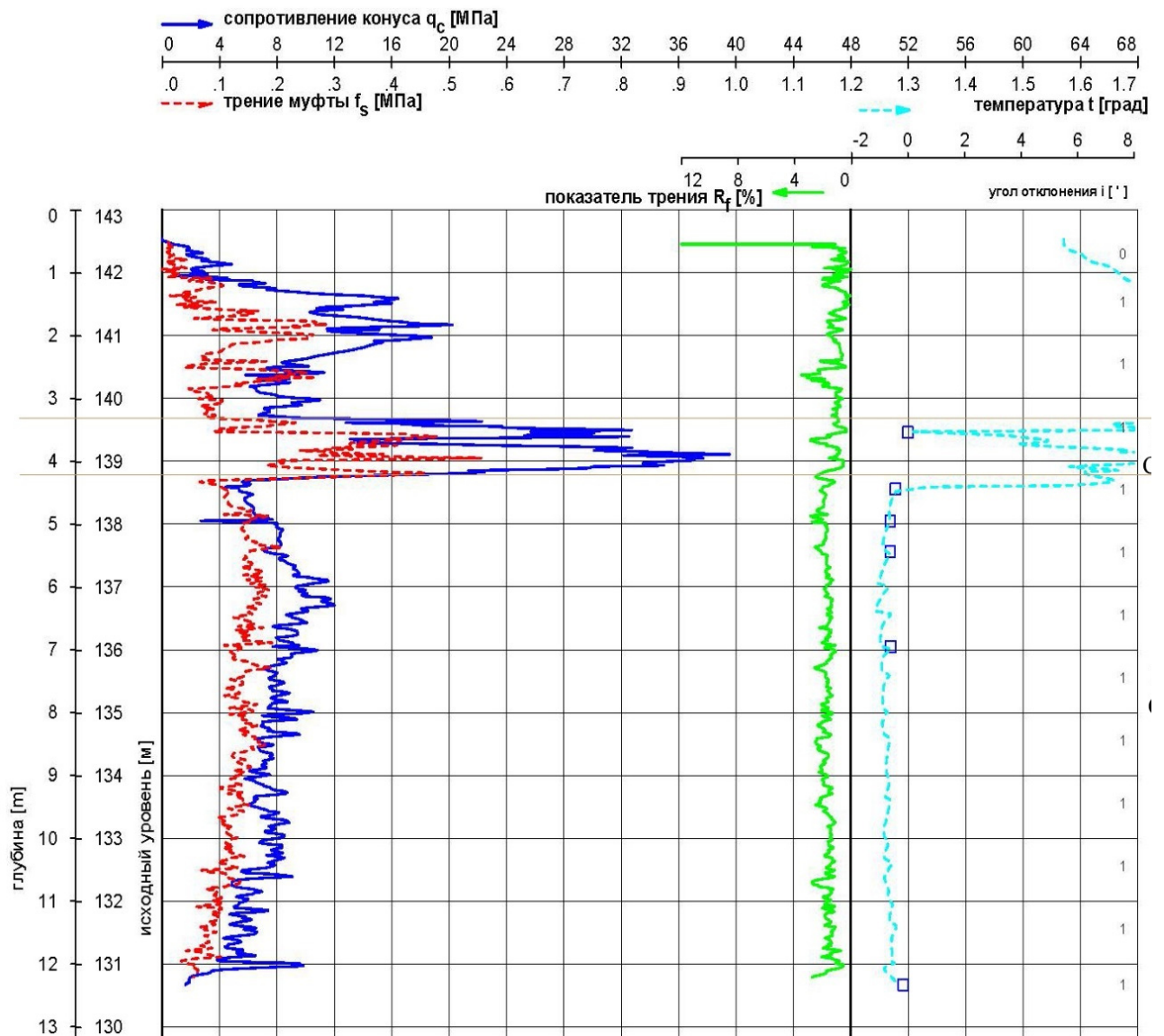


Рисунок 77 — График статического зондирования на железнодорожном полотне

По результатам зондирования установлено, что в ходе досыпки и выравнивания мощность насыпи увеличилась с проектных 1,5 м до 4,2 м, грунты насыпи находятся при положительной температуре, промерзания от подстилающей толщи ММГ не происходит. Также выделено два, различающихся по сопротивлению внедрению зонда, слоя в насыпи. Менее прочная верхняя часть сложена гравийным материалом, при помощи которого проводились работы по выравниваю уровня, в основании насыпи расположен песок, плотного сложения. Ниже залегает грунт естественного сложения в мерзлом состоянии. Для каждого из слоев, слагающих ж/д насыпь, в соответствии с СП 25.13330.2012 [78] оценивались механические свойства по данным зондирования. Показатели для нижней части насыпи, сложенной песчанно-гравийной смесью составили $E_f = 42$ МПа и $C_{eq} = 480$ кПа, для нижележащего слоя естественного основания, сложенного мерзлыми суглинками с тонкошлировой криотекстурой, $E_f = 20$ МПа и $C_{eq} = 67$ кПа.

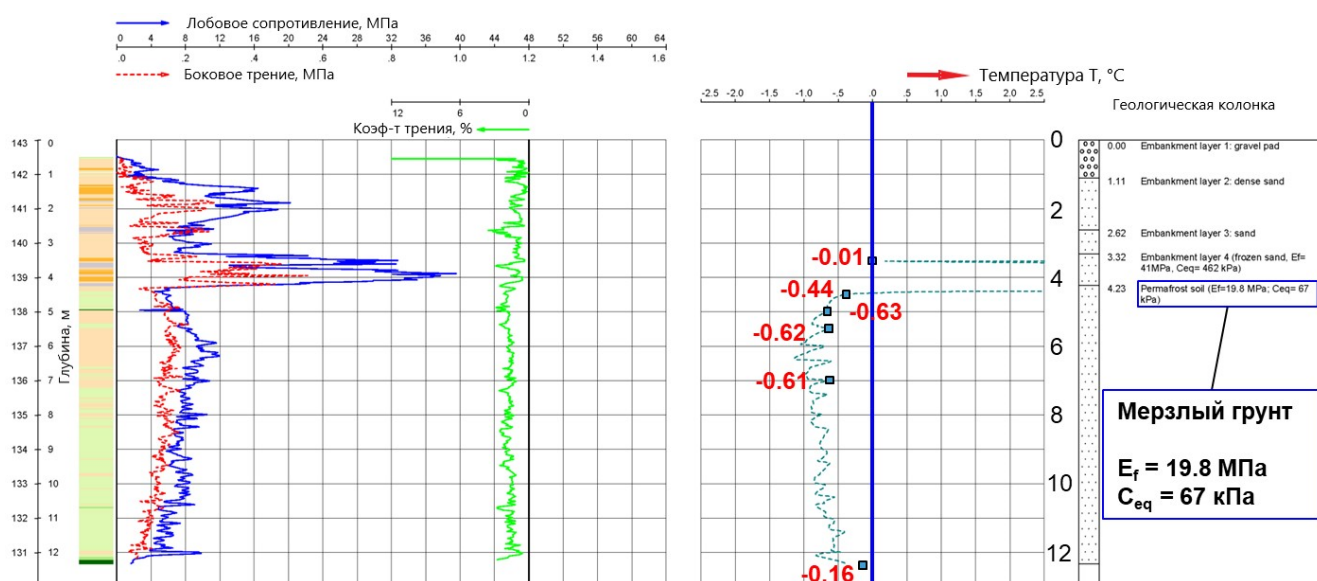


Рисунок 78 — Профиль статического зондирования совмещенный с геологической колонкой

Так профиль статического зондирования показывает наличие мерзлого грунта в интервале с 4 до 12 м и температуре грунтов от $-0,1^{\circ}\text{C}$ до $-0,7^{\circ}\text{C}$. Однако на графике статического зондирования отчетливо виден слой ослабленного грунта в интервале от 4 до 5 м, что может быть вызвано переувлажнением грунта фильтрующей сквозь насыпь водой и причиной возможных деформаций всей находящейся выше ж/д насыпи. Таким образом, данные показали, что на испытательном полигоне сохранены грунты в мерзлом состоянии и не оттаивают, как ожидалось. Однако деформации железнодорожных путей является убедительным свидетельством деградации мерзлоты, которое требует более детального изучения [95].

Результаты применения статического зондирования показали, что причина осадок связана не столько с изменением теплового радиационного режима, вызванного насыпью железной дороги, сколько мощностью самой балластной подсыпки насыпи и ее массой, а также высокими динамическими нагрузками на мерзлые грунты, которые находятся при температуре близкой к температуре начала замерзания, имеют высокую льдистость и в полной мере проявляют свойства тиксотропии и реологического течения.

6.3 Инженерно-геокриологический мониторинг за состоянием мерзлых грунтов

Геотехнический мониторинг инженерных сооружений, построенных на многолетнемерзлых грунтах, имеет очень большое значение для безопасной эксплуатации этих сооружений [62]. Как приведено в [10], многолетнемерзлый грунт очень чувствителен к изменениям в его температуре и засоленности, что обычно вызвано изменением климата и техногенным воздействием. Таким образом, высоко востребована технология геотехнического мониторинга, которая основывается на необходимых и достаточных данных о мерзлом состоянии грунтового основания под наблюдаемым инженерным сооружением.

На сегодня большинство инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах построено на свайных основаниях. Ниже рассматривается 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 четыре стадии (Таблица 12):

1. Нормальное состояние мерзлого грунтового основания – 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 («как было» до начала строительства), либо холоднее (применение охлаждающих установок). Сегодня принято считать, что если температура мерзлого грунтового основания поддерживается на определенном постоянном уровне, то проблем от вечной мерзлоты ожидать не стоит.
2. Ослабленное состояние мерзлого грунтового основания 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 мерзлого грунтового основания наступает вследствие продолжающегося ослабления грунта и достигает той точки, когда наступают пластические деформации мерзлого грунта, небольшие осадки некоторых свай, фактическая несущая способность 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.
4. Аварийное состояние мерзлого грунтового основания 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, как правило, прекращению его эксплуатации.

Таблица 12 — Классификация состояния мерзлого грунтового основания по отношению к свайным фундаментам (составлено автором)

Состояние мерзлого грунтового основания	Описание факторов
1. Нормальное	Видимых проблем не обнаружено Нагрузка на сваю < Фактическая НСС* ≈ Проектная НСС Фактическая температура грунта ≤ Проектная температура грунта
2. Ослабленное	Видимых проблем не обнаружено Нагрузка на сваю < Фактическая НСС < Проектная НСС Проектная температура грунта < Фактическая температура грунта
3. Слабое	Обнаружены небольшие нарушения (трещины) / небольшие осадки отдельных свай. Нагрузка на сваю ≈ Фактическая НСС < Проектная НСС Проектная температура грунта < Фактическая температура грунта
4. Аварийное	Обнаружены критические деформации и осадки свай. Фактическая НСС < Нагрузка на сваю < Проектная НСС Проектная температура грунта < Фактическая температура грунта

*НСС – несущая способность сваи

Приведенная классификация (Таблица 12) позволяет точно определить 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, такие как:

1. Применение теплоизоляционных материалов,
2. Корректировка работы уже установленных термостабилизаторов,
3. Контроль стока поверхностных вод,
4. Изменение схемы очистки поверхности грунта от снега на территории вблизи инженерного сооружения,
5. Обнаружение и устранение протечек воды из системы водоснабжения/водоотведения инженерного сооружения,
6. Другое.

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

1. Применение дополнительных термостабилизаторов,
2. Укрепление конструкции сооружения с помощью дополнительных опор, подпорных устройств и др.,
3. Укрепление ростверка фундамента,
4. Установка дополнительных свай,
5. Другое.

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

Существующие методы геотехнического мониторинга инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах делятся на три группы:

1. геодезический мониторинг,
2. структурный мониторинг
3. температурный мониторинг.

Геодезический мониторинг использует такие методы как 3D лазерное сканирование (LIDAR), тахеометр, гидравлический уровень и др. Все методы этой группы измеряют расстояния, углы, координаты и т.д. по отношению в точке отсчета через определенный период времени. Сравнение полученных измерений дает оценку, произошло ли смещение сооружения и на сколько. Эти методы измеряют только деформацию (смещение) сооружения, что происходит только в Слабом или Аварийном состояниях мерзлого грунтового основания. Геодезический мониторинг не позволяет предсказать, начнутся деформации основания или нет. В Нормальном и Ослабленном состояниях, поскольку деформаций и осадок на этих стадиях не происходит.

Структурный мониторинг или мониторинг нагрузок в структуре конструкций включает методы, использующие датчики деформации и/или тензометры (динамометры), которые устанавливаются в структурные элементы сооружения для геотехнических целей, либо внутри сваи, либо на контакте между оголовком сваи и непосредственно самого сооружения. Датчики деформации измеряют величину деформации, которую испытывает материал сваи. Тензометры измеряют нагрузку, передаваемую от сооружения на сваю. Анализ напряженно-деформированного состояния структуры сооружения и распределение нагрузок на сваи позволяет 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, которые установлены около свай и/или термостабилизаторов. Этот вид мониторинга является самым распространенным решением в зоне распространения ММГ. Температурный мониторинг отслеживает температурный режим мерзлого грунтового основания. Если температура грунтов не выходит за пределы проектных значений, состояние грунтов принято считать нормальным. Если же температура грунтов выше проектных значений, тогда основываясь на субъективном мнении экспертов, разрабатываются 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 и приводят к необоснованным большим материальным и финансовым затратам. Если же меры по инженерной защите не предпринимаются, тогда часто состояние мерзлого

грунтового основания достигает аварийного, что приводит к потере инженерного сооружения. Таким образом, температурный мониторинг является необходимой частью 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 рекомендуется с использованием специального зонда 3-в-1, который позволяет измерить в одно испытание (задавливание) следующие параметры:

1. q_c , МПа – лобовое сопротивление, или сопротивление наконечника зонда вдавливанию в грунт,
2. f_s , МПа – боковое трение, или трение муфты зонда в процессе его вдавливания в грунт,
3. T , °С – температура грунта,
4. u_2 , кПа – поровое давление,
5. K , См/м – электропроводность грунта.

На основе получаемых данных с помощью вышеперечисленных датчиков определяются следующие характеристики:

1. Температура грунта (прямое измерение),
2. Засоленность грунта, рассчитанная на основе результатов по электропроводности,
3. Несущая способность свай и механические свойства (деформационные и прочностные), рассчитанные по СТО 36554501–049–2016 [80],
4. Длительная несущая способность свай, определенная по разработанной методике [8, 11, 50].

Для геотехнического мониторинга испытание статическим зондированием мерзлого грунтового основания необходимо производить в заранее установленных локациях периодически 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. Получаемые результаты в одной локации сравниваются с результатами предыдущих испытаний, таким образом, оценивается тренд изменения оцениваемых параметров (температура, засоленность, несущая способность свай и др.). Если один из параметров последовательно (устойчиво) изменяется, тогда анализируется тренд и рассматриваются меры по инженерной защите.

Пример анализа несущей способности свай приведен в Таблица 13, где на основе соотношения измеренной несущей способности свай (НСС), нагрузки на сваю (НС) и проектной НСС произведена оценка состояния мерзлого грунтового основания.

Таблица 13 — Геотехнический мониторинг на основе технологии статического зондирования (составлено автором)

Состояние мерзлого грунтового основания	Соотношение НСС, рассчитанной по данным статического зондирования, с проектной НС
1. Нормальное	Измеренное значение НСС близко или превышает проектное значение НСС
2. Ослабленное	Измеренное значение НСС меньше проектного значения НСС, но выше проектному значению НС
3. Слабое	Измеренное значение НСС меньше проектного значения НСС и близко к проектному значению НС
4. Аварийное	Измеренное значение НСС меньше проектного значения НС

Таким образом, статическое зондирование на мерзлых грунтах – это единственный метод на сегодня, 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 на сколько мерзлое грунтовое основание начинает деградировать. Также использование статического зондирования позволяет спрогнозировать, когда и при каких условиях наступит слабое состояние мерзлого грунтового основания, поскольку выполняется не только измерение температуры грунтов, но и производится оценка засоленности, механических свойств грунтов и несущей способности сваи.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Выполнено обоснование применения статического зондирования для измерения температуры мерзлых грунтов, удовлетворяющее нормативным требованиям к полевым измерениям температуры. Разработана экспресс-методика измерения температуры грунта статическим зондированием. Показано хорошее совпадение между значениями температуры, полученными при помощи статического зондирования и скважинной термометрией.

2. Разработанная методика обработки «хвоста» кривой релаксации напряжений позволяет точно и однозначно рассчитать значения коэффициентов уравнения длительной прочности мерзлого грунта на сжатие и сдвиг. Применение статического зондирования со стабилизацией для мерзлых грунтов длительностью первые десятки минут достаточно для определения их длительной прочности на сжатие и на сдвиг.

3. Разработанное приложение к программе сбора полевых данных позволяет измерить длительную прочность построением «опережающей» кривой длительной прочности и устанавливает начало II участка кривой релаксации напряжения в полевых условиях.

4. В ходе опытной проверки разработанной методики выполнено сравнение значений несущей способности свай, полученных по результатам полевого испытания статической вдавливающей нагрузкой с результатами расчета по методике СП 25.13330.2012. Сравнение показало, что расчет по СП 25.13330.2012 дает существенно более высокие значения несущей способности, особенно в части бокового трения поверхности свай о грунт. Применение разработанной автором методики позволяет выполнить расчеты несущей способности свай без использования эмпирических коэффициентов и получить результаты, которые хорошо совпадают с данными испытаний натуральных свай статической вдавливающей нагрузкой.

5. На основе разработанной автором методики оценены показатели прочностных свойств некоторых характерных типов многолетнемерзлых грунтов, изученных около городов Салехард, Лабытнанги и Новый Уренгой. Сравнение результатов с рекомендованными значениями соответствующих показателей в СП 25.13330.2012 показало, что для всех рассмотренных типов грунтов значения σ_c превышают рекомендованные значения давления под нижним концом свай R . Для супесей нельдистых и песков слабольдистых средней крупности значения σ_s превышают рекомендованные R_{af} . Для суглинков слабольдистых и льдистых, а также песков слабольдистых пылеватых значения σ_s ниже рекомендованных R_{af} .

6. Разработан подход к проведению инженерно-геокриологического мониторинга мерзлых грунтовых оснований, позволяющий диагностировать состояние мерзлого основания на стадии II, предложенной классификации и предпринять своевременно требуемые меры инженерной защиты наблюдаемых мерзлых грунтовых оснований. Подход основан на сравнении получаемых результатов статического зондирования в одной точке с результатами предыдущих испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов, В.И. Исследование механических свойств засоленных грунтов как оснований сооружений. (На примере грунтов Арктического побережья): автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 25.00.08 / Аксенов Виктор Иванович. – М., 1980. – 23 с.
2. Аксенов, В.И., Шейкин, И.В. Оценка критериев области пластичномерзлого состояния засоленных мерзлых грунтов/ В.И.Аксенов // Инженерно-строительные изыскания в Якутской АССР. – 1989.
3. Аксенов, В.И. Рекомендации по определению прочности мерзлых грунтов с морским типом засоления / В.И.Аксенов [и др.]; – М.: ФГУП ПНИИИС, 2001. – 42 с.
4. Архипов, С.А. Последнее оледенение в Нижнем Приобье / С.А. Архипов [и др.]; – Новосибирск: Наука, 1977. – 214 с.
5. Архипов, С.А. Стратиграфия и геологическое строение четвертичного покрова Нижнеобско-Ямальско-Тазовского региона Западной Сибири / С.А. Архипов [и др.] // Геология и геофизика. – 1994. – № 6 – С. 87–104.
6. Архипов, С.А. Хронология геологических событий позднего плейстоцена Западной Сибири // Геология и геофизика. 1997. – № 12 – С. 1863–1884.
7. Болдырев, Г.Г., Малышев, М.В. Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах) / Г.Г. Болдырев, М.В. Малышев. – 4-е изд., перераб. и доп.– Пенза: ПГУАС, 2009. – 412 с. – ISBN 987-5-9282-0575-1
8. Волков, Н.Г., Соколов, И.С. Методика расчета несущей способности свай в многолетнемерзлых грунтах на основе измерений релаксации напряжения, полученных с помощью статического зондирования / Н.Г. Волков // Сборник докладов Межд. н.-т. конф. «Современные технологии проектирования и строительства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах». – М., 2018. – С. 36–42.
9. Волков, Н.Г., Соколов, И.С., 2018. Сравнение температурных замеров грунтов с помощью статического зондирования и скважинной / Н.Г. Волков, И.С. Соколов // Инженерные изыскания. – 2018. – № 7–8. – С. 16–24.
10. Волков, Н. Г., Соколов, И. С. Геотехнический мониторинг мерзлого грунтового основания с помощью статического зондирования / Н.Г. Волков, И.С. Соколов // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 5. – С. 52–59.
11. Волков, Н.Г., Соколов, И.С. Расчет несущей способности свай на основе определения длительной прочности в массиве мерзлых грунтов методом статического зондирования / Н.Г. Волков, И.С. Соколов // Геотехника. – 2019. – № 1. – С. 68–78.
12. Волков, Ф.Е., Исаев, О.Н. О возможности использования установки С-832М для контроля и оценки изменения температуры вечномерзлых грунтов // Тезисы Всесоюзного совещания «Геокриологический прогноз при строительстве и освоении территорий.» – Воркута. – 1985. – с. 224-226.
13. Вялов, С.С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов. / С.С. Вялов. – М.: АН СССР, 1959. – 190 с.

14. Вялов, С.С. Методика определения характеристик ползучести длительной прочности и сжимаемости мерзлых грунтов / С.С. Вялов [и др.]; – М.: Наука, 1966. – 131 с.
15. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов: учебное пособие для строительных вузов / С.С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
16. Вялов, С.С., Миренбург, Ю.С. Динамометрический способ испытания свай в грунтах, обладающих свойствами ползучести // Тр. НИИ оснований – 1982. – Вып. 77. – С. 59-69.
17. Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э. Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – 454 с.
18. Голубков, В.Н. Несущая способность свайных оснований / В.Н. Голубков // Машстройиздат, 1950. – 141 с.
19. Гольдштейн, М. Н. Некоторые вопросы развития механики грунтов. // «Основания, фундаменты и механика грунтов», – № 1, – 1960.
20. Гольдштейн, М. Н., Бабицкая, С. С, Мизюмский, В. А. Методика испытания грунтов на ползучесть и длительную прочность. // «Вопросы геотехники», – сб. № 5, – 1952.
21. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн – М.: Стройиздат, 1971. – 367 с.
22. Грачев, С.В., Мальцева Л.А. Релаксация напряжений пружинной ленты при изгибе / С.В. Грачев, Л.А. Мальцева. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 18 с.
23. Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимова. – 6-е изд., перераб. и доп. (серия «Классический университетский учебник») / В. Т. Трофимов и [и др.]; – М.: Изд-во МГУ и «Наука», 2005. – 1024 с.
24. Гуськов, И. А., Полевые испытания грунтов дилатометром Маркетти / И.А. Гуськов // Геотехника. – 2014. – № 3. – С. 5–14.
25. Датчики электрической проводимости водных растворов [Электронный ресурс]. Ссылка: <http://efo-sensor.ru/datchiki-elektricheskoy-provodimosti-vodnih-rastvorov.html>, дата обращения 26.05.2019.
26. Ершов, Э.Д. Общая геокриология / Э.Д. Ершов – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. – 683 с. – ISBN 5-211-04513-0
27. Ершов, А.Е., Нутрихин, В.В. Оценка несущей способности набивных свай с использованием данных статического зондирования / А.Е. Ершов, В.В. Нутрихин // Инженерные изыскания. – 2011. – №7. – С. 42–52.
28. Захаров, М. С. Статическое зондирование в инженерных изысканиях: учебное пособие / М.С. Захаров. – СПб: Санкт-Петербургский гос. архитектурно-строительный ун-т, 2007. – 71 с. – ISBN 978-5-6227-0089-4
29. Зыков, Ю.Д., Геофизические методы исследования криолитозоны / Ю.Д. Зыков. – М.:Издательство МГУ, 1999. – 243 с.
30. Зылева, Л.И. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-42 – Салехард. Объяснительная записка / Л.И. Зылева [и др.] – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. – 396 с.
31. Инженерная геология СССР. Том 2. Западная Сибирь / Под ред. Е. М. Сергеева. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1976. – 657 с.

32. Исаев, О.Н., Волков, Ф.Е. [и др.] Определение несущей способности свай в пластично–мерзлых грунтах статическим зондированием / О.Н. Исаев, Ф.Е. Волков // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1987. – №5 – С. 17–19.
33. Исаев, О.Н. Развитие метода статического зондирования для целей проектирования свайных фундаментов в пластично–мерзлых грунтах: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Исаев Олег Николаевич. – М., 1989. – 226 с.
34. Исаев, О.Н., Шарафутдинов, Р.Ф., Волков, Н.Г., Минкин, М.А., Дмитриев, Г.Ю., Рыжков, И.Б. Геотехнический контроль грунтовых оснований методом статического зондирования в криолитозоне / Исаев О.Н., Шарафутдинов Р.Ф. [и др.] // Геотехника. – 2017. – № 15. – С. 20–31.
35. Ишлинский, А.Ю., 1943. Об устойчивости вязкопластического течения полосы и круглого прута / А.Ю. Ишлинский // Прикладная математика и механика. – 1943. – Т. 7, № 2. – С. 109–130.
36. Ишлинский, А.Ю. Осесимметричная задача пластичности и проба Бринелля / А.Ю. Ишлинский // Прикладная математика и механика. – 1944. – Т. 8 – С. 201–224.
37. Коновалов, А.А. К теории прочности мерзлого грунта / А.А. Коновалов // Криосфера Земли. – 2009. – Т. 13, № 1. – С. 31–39.
38. Корректировка генерального плана города Салехарда. Материалы по обоснованию проекта / Заказано Департаментом строительства, архитектуры и земельных отношений администрации МО г. Салехарда. – СПб., 2014. – 202 с.
39. Кулачкин, Б.И. Экспериментально-теоретические исследования и разработка метода зондирования в инженерной геологии: дисс. ... док. геолого-минералогических наук: 04.00.07 / Кулачкин Борис Иванович. – М., 1990. – 348 с.
40. Локтев, А.С. Методические основы инженерно-геологических изысканий для нефтегазопромысловых сооружений на шельфе Арктических морей: дис. ... канд. геолого-минералогических наук: 25.00.08 / Локтев Алексей Сергеевич. – М., 2004. – 256 с.
41. Мариупольский, Л.Г. Исследования грунтов для проектирования и строительства свайных фундаментов / Л.Г. Мариупольский. – М.: Стройиздат, 1989. – 195 с. – ISBN 5-274-00501-2
42. Методические рекомендации по проведению скоростных инженерно-геологических изысканий для проектирования объектов массового строительства на забивных сваях. – Уфа: НИИпромстрой, 1983. – 26 с.
43. Методы геокриологических исследований: Учеб. пособие / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 512 с. – ISBN 5-211-06121-7
44. Официальный сайт GeoPrecision. Temperature Strings for M–Log5W–W2R10 Wireless Temperature Data Logger [Электронный ресурс] – 2015. URL: ftp://80.153.164.175/GeoPrec/Docu_Software/GP_Wireless/mlog5w_tempstring_pt1k.pdf (дата обращения: 15.06.2018).
45. Пендин, В.В. Мерзлотоведение: учебное пособие / В.В. Пендин. – М.: Изд. МГГРУ, 2003. – 77 с.
46. Роман, Л. Т. Механика мерзлых грунтов / Л.Т. Роман. – М.: Наука / Интерпериодика, 2002. – 425 с. – ISBN 5-7846-0090-7

47. Рыжков, И.Б. Общая методология и практические методы применения статического зондирования грунта для проектирования свайных фундаментов: дис. ... док. техн. наук: 05.23.02 / Рыжков Игорь Борисович. – Уфа, 1992. – 565 с.
48. Рыжков, И. Б., Исаев, О.Н., Статическое зондирование грунтов / И.Б. Рыжков, О.Н. Исаев // АСВ. – 2010. - 496 с.
49. Соколов, И.С., 2017. Интервью для электронного журнала «Геоинфо» [Электронный ресурс], 15.12.2018 года. Ссылка: <https://www.geoinfo.ru/product/sokolov-ivan-sergeevich/ivan-sokolov-na-obskoj-gube-my-postavili-rekord-i-oprobovali-novye-tehnologii-36451.shtml>, дата обращения 04.02.2019.
50. Соколов И. С. Диагностика с помощью статического зондирования мерзлого грунтового основания, охлажденного термостабилизаторами / И.С. Соколов // Научный вестник Ямало-ненецкого автономного округа – устойчивое развитие Арктики. – 2019. – № 1 (102) – С. 65–73.
51. Трофименков, Ю.Г., Воробков, Л.Н. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов / Ю.Г. Трофименков – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1981. – 215 с.
52. Трофименков, Ю.Г., Минкин, М.А., Гвоздик, В.И. Определение несущей способности свай в вечномерзлых грунтах статическим зондированием // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1986. – № 2. –С. 18-20.
53. Трофименков, Ю.Г. Статическое зондирование грунтов в строительстве (Зарубежный опыт) / Ю.Г. Трофименков – М.: ВНИИГТИ, 1995. – 127 с.
54. Трофимов, В.Т., Бадю, Ю.Б. [и др.] Полуостров Ямал. / Под ред. В.Т. Трофимова – М.: Изд.-во Моск. Ун-та, 1975. – 278 с.
55. Труфанов, А.Н., 2015. Определение параметров консолидации грунта методом релаксации напряжений / А.Н. Труфанов // Инженерные изыскания. – 2015. – № 12. – С. 18–21
56. Тюрин А.И., Исаев, В.С., Сергеев, Д.О., Тумской, В.Е., Волков, Н.Г., Соколов, И.С., Комаров, О.И., Кошурников, А.В., Гунар, А.Ю., Комаров, И.А., Ананьев, В.В. Совершенствование полевых методов инженерно-геокриологических исследований / А.И. Тюрин [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2019. – № 1. – С. 104–116.
57. Цернант, А.А., Рекомендации по инженерно-геокриологическим изысканиям для строительства мостов и труб на вечномерзлых грунтах севера тюменской области, включая Ямал. / А.А. Цернант // Минтрансстрой СССР. – 1988.
58. Цытович, Н.А., Механика грунтов. / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1963. – 259 с.
59. Цытович, Н.А. Механика мерзлых грунтов: учебн. пособие / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1973. – 448 с.
60. Фролов, А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов / А.Д. Фролов. – Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1988. – 515 с.
61. Шокальский, М. Ю. Методы статического зондирования грунтов СPTU, SCPT и RCPT: практика применения, анализа и обработки их результатов / М.Ю. Шокальский // Инженерные изыскания. – 2013. – № 8. – С. 40–45.
62. Хрусталева, Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне: Учебник / Л.Н. Хрусталева. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. – 541 с – ISBN 5-211-05022-3

63. ГОСТ 12071–2014 Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. – М.: Стандартиформ, 2015. – 12 с.
64. ГОСТ 19912–2012 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. – М.: Стандартиформ, 2013. – 23 с.
65. ГОСТ 20069–74 Грунты. Метод полевого испытания статическим зондированием. – М.: Издательство стандартов, 1974. – 8 с.
66. ГОСТ 20069–81 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 12 с.
67. ГОСТ 20276–2012 Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. – М.: Стандартиформ, 2013. – 50 с.
68. ГОСТ 20522–2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – М.: Стандартиформ, 2013. – 19 с.
69. ГОСТ Р ИСО 22476–1–2017. Испытания полевые. Часть 1. Статическое и пьезостатическое зондирование электрическим зондом. – М.: Стандартиформ, 2017. – 36 с.
70. ГОСТ 25100–2011 Грунты. Классификация. – М.: Стандартиформ, 2013. – 44 с.
71. ГОСТ 25358–2012 Грунты. Метод полевого определения температуры измерения температуры. – М.: Стандартиформ, 2013. – 8 с.
72. ГОСТ 5686–2012 Методы полевых испытаний сваями. – М.: Стандартиформ, 2013. – 47 с.
73. ГОСТ Р 58270–2018. Грунты. Метод испытаний расклинивающим дилатометром. – М.: Стандартиформ, 2018. – 14 с.
74. РСН 31–83 Нормы производства инженерно-геологических изысканий для строительства на вечномёрзлых грунтах. – М. Госстрой РСФСР, 1983. – 45 с.
75. РСН 33–70 Инструкция по испытанию грунтов статическим зондированием. – М.: Госстрой РСФСР, 1970. – 30 с.
76. СН 448–72 Указания по зондированию грунтов для строительства. – М.: Стройиздат, 1973. – 32 с.
77. СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 – М.: Госстрой, 2011 – 116 с.
78. СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 – М.: Госстрой, 2012 – 123 с.
79. СП 47.13330.2012 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11–02–96. – М.: Госстрой, 2013. – 115 с.
80. СТО 36554501–049–2016 Применение статического зондирования для контроля оснований в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. – М.: ОАО «НИЦ «Строительство», 2016. – 58 с.
81. Tyurin, A.I., Isaev, V.S., Sergeev, D.O., Tumskoi, V.E., Volkov, N.G., Sokolov, I.S., Komarov, O.I., Koshurnikov, A.V., Gunar, A.Yu., Komarov, I.A., and Anan'ev, V.V. Improvement of field methods for engineering geocryological surveying / A.I. Tyurin [and etc.] // Moscow University Geology Bulletin. – 2019. – No. 74(3). - pp. 70–82.

82. Broms, B.B., Flodin, N. History of soil penetration testing / B.B. Broms, N. Flodin // Proceedings International Symposium on Penetration Testing. ISOPT 1. 1 – 1988. – p. 157-220.
83. Buteau, S., and Fortier, R. Penetration rate-controlled CPT in permafrost / Edited by D. Leboeuf. Bitech Publishers Ltd., Richmond, B.C // In Proceedings of the 53th Canadian Geotechnical Conference, Montréal, Q.C. – 2000. – Vol. 2. – pp. 1229–1236.
84. Buteau, S., Fortier, R. Rate-controlled cone penetration tests in permafrost / S. Buteau [and etc.] // Canadian Geotechnical Journal – 2005 – Vol. 42, No. 1 – pp. 184–197.
85. Fortier, R., Yu, W. Penetration rate-controlled electrical resistivity and temperature piezocone penetration tests in warm ice-rich permafrost in Northern Quebec (Canada) / R. Fortier, W. Yu // Cold Regions Engineering 2012: Sustainable Infrastructure Development in a Changing Cold Environment – 2012. – pp. 757–767.
86. Isaev, O.N., Ryzhkov, I.B. TCPT in permafrost: penetrometer - soil thermophysical interaction / O.N. Isaev, I.B. Ryzhkov // Proceedings of the Second International Symposium on Cone Penetration Testing. CPT'10, USA, Huntington Beach – 2010. – Vol. 2, No. 2. – 9 p.
87. Ladanyi, B. Determination of geotechnical parameters of frozen soils by means of the cone penetration test. / B. Ladanyi // Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing. – 1982. – Vol. 1. – pp. 671–678.
88. Ladanyi, B. Use of static penetration test in frozen soils / B. Ladanyi // Canadian. Geotechnical Journal. – 1976. – No 2 13 (2). – pp. 95–110.
89. Lunne, T. Cone penetration testing in geotechnical practice. / T. Lunne [and etc.] // Publishing house of the Spon Press, London and New York. – 1997. – 352 p.
90. McCallum, A.B. Cone penetration testing in polar snow (Doctoral thesis). [Electronic resource] / A.B. McCallum. – 2012. URL: <https://doi.org/10.17863/CAM.16312>
91. McCallum, A. Cone penetration testing (CPT) in Antarctic firn: An introduction to interpretation / A.B. McCallum // Journal of Glaciology. – 2014. – No. 60(219). – pp. 83–93.
92. Paul W. Mayne, NCHRP Project 20–05 Topic 37–14 Cone Penetration Testing State-of-Practice / W. Paul, Mayne. – Washington, DC, 2007. – 137 p.
93. Peuchen, J. «Deepwater Cone Penetration Tests» / J. Peuchen. – Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 2000. – 9 p.
94. Ryzhkov, I.B., Isaev, O.N. Cone Penetration Testing of Soils in Geotechnics / I.B. Ryzhkov, O.N. Isaev // Bokforlaget Efron and Dotter AB. – 2016. – 408 p.
95. Sokolov, I.S. [and etc.] Cone Penetration Testing for Railways on Permafrost / I.S. Sokolov [and etc.] // Proceedings XI International Conference on Permafrost. – 2016. – pp. 1144–1145.
96. Trofaier, A. & Bartsch, Annett & Rees, Gareth & Leibman, Marina. (2013). Assessment of spring floods and surface water extent over the Yamalo-Nenets Autonomous District. Environmental Research Letters. 8. 5026-. 10.1088/1748-9326/8/4/045026.
97. Vardon, P.J. [and etc.] Thermal Cone Penetration Test (T-CPT). In Hicks, M.A., Pisanò, F. and Peuchen, J. eds. Cone Penetration Testing 2018: Proceedings of the 4th International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'18): Delft, The Netherlands, 21–22 – June 2018. Boca Raton: CRC Press – pp. 649–655.
98. Vardon, P.J., Interpreting and validating the thermal cone penetration test (T-CPT) / P.J. Vardon [and etc.]; – 2018. – Paper No. 17 – 214 p.

99. Vlasblom, A. The Electrical penetrometer: A Historical Account of Its Development. LGM Mededelingen Report No. 92 / A. Vlasblom // The Netherlands: Delft Soil Mechanics Laboratory, 1985. - 51 p.
100. Volkov N., Sokolov, I., and Jewell, R. Investigation by Cone Penetration Tests of Piled Foundations in Frozen Soil Maintained by Thermosyphons / N. Volkov [and etc.] // American Scientific Research Journal for Engineering, Technology and Sciences. – 2017. – Vol. 31, No. 1. – pp. 40–58.
101. Volkov, N., Sokolov, I., Jewell, R. Cone penetration testing of permafrost soils / N. Volkov [and etc.] // Proceedings 5th European Conference on Permafrost. – 2018. – pp. 215–216.
102. Volkov, N., Sokolov, I., Jewell, R. CPT Testing in Permafrost. Proceedings 4th International Symposium on Cone Penetration Testing / N. Volkov [and etc.] // – CPT'18. – Netherlands, Delft – 2018. – pp. 1258–1268.
103. Urish, D.W. Electrical Resistivity – Hydraulic Conductivity Relationships in Glacial Outwash Aquifers / D.W. Urish // Water Resources Research. – 1981. – Vol. 17, Issue 5 – pp. 1401–1408.
104. ASTM D 5778 Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils [Electronic resource]. – URL: <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=31850.wba>
105. ASTM D6067 / D6067M – 17 Standard Practice for Using the Electronic Piezocone Penetrometer Tests for Environmental Site Characterization and Estimation of Hydraulic Conductivity [Electronic resource]. – URL: <https://www.astm.org/Standards/D6067.htm>
106. BS 5930:1999 Code of Practice for Site Investigations. – London: BSI British Standards Institution, 1999. – 206 p.
107. ISO 22476 – 1: 2012 Geotechnical investigation and testing –Field testing –Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test [Electronic resource]. – URL: <https://infostore.saiglobal.com/preview/98699984657.pdf>
108. ISO 22476 – 4: 2012. Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 4: Ménard pressuremeter test [Electronic resource]. – URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:57729:en>
109. ISO 22476 – 8: 2018. Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 8: Full displacement pressuremeter test [Electronic resource]. – URL: <https://www.iso.org/standard/72220.html>.
110. ISO 22476 – 11: 2017. Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 11: Flat dilatometer test [Electronic resource]. URL: <https://www.iso.org/standard/66434.html>
111. ISO 22476 – 12: 2009 Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 12: Mechanical cone penetration test (CPTM) [Electronic resource]. URL: <https://www.iso.org/standard/39086.html>.
112. International reference test procedure for Cone Penetration Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils. – Linköping: Swedish Geotechnical Institute, 1989. - 6–16 p.

СПИСОК ИЛЛЮСТРАЦИЙ

Рисунок 1 — Кривая незатухающей ползучести [14, 15].....	13
Рисунок 2 — Кривые ползучести (а) и кривая длительной прочности (б) [15].....	14
Рисунок 3 — Карта распространения многолетнемерзлых пород в Северном полушарии	16
Рисунок 4 — Схемы установок определения сил морозного пучения грунтов (описание в тексте) [43]	18
Рисунок 5 — Принципиальная схема установки для испытания сваи статической нагрузкой (описание в тексте) [43]	20
Рисунок 6 — Пример графического представления данных испытания сваи статической вдавливающей нагрузкой	20
Рисунок 7 — Схема установки для определения сопротивления мерзлого грунта срезу (описание в тексте) [43]	21
Рисунок 8 — Графики результатов определения сопротивления мерзлого грунта срезу	22
Рисунок 9 — Схема установки для испытания мерзлых грунтов шаровым штампом в полевых условиях (описание в тексте) [43]	23
Рисунок 10 — Принципиальная схема установки для испытания мерзлых грунтов методом горячего штампом (описание в тексте) [43]	24
Рисунок 11 — Схемы лабораторных испытаний для определения механических свойств мерзлых грунтов (описание в тексте) [46]	26
Рисунок 12 — Динамометрический прибор для испытания на длительную прочность и ползучесть (описание в тексте) [15]	28
Рисунок 13 — Графики результатов испытаний мерзлого грунта в динамометрическом приборе: а – при разовом нагружении, б – при ступенчатом нагружении [15]	29
Рисунок 14 — Виды полевых зондов и пробоотборников (описание в тексте) [92].....	33
Рисунок 15 — Установка статического зондирования С-832М [47].....	36
Рисунок 16 — Фотография установки статического зондирования С-832М [47]	36
Рисунок 17 — Тяжелая установка статического зондирования Фугро на базе а\м Урал (фото автора)	37
Рисунок 18 — Тяжелая установка статического зондирования Фугро с подвесной гусеничной платформой на базе а\м MAN (фото автора).....	38
Рисунок 19 — Установка статического зондирования Фугро на гусеничном ходу (фото автора)	39

Рисунок 20 — Малогабаритная установка статического зондирования (монопод) во время испытания (фото автора)	40
Рисунок 21 — Схема компоновки датчиков зонда (составлено автором).....	41
Рисунок 22 — Пример влияния избыточного u_2 на показания лобового сопротивления q_c [92].	44
Рисунок 23 — График измерения диссипации порового давления в глине (данные автора).....	45
Рисунок 24 — Схема работы установки измерения электропроводности [25].....	46
Рисунок 25 — Измерение удельного электрического сопротивления грунта: а) график удельного сопротивления; б) схема расположения датчиков на зонде [89].....	47
Рисунок 26 — а) поле бугров пучения, стрелкой обозначена точка зондирования; б) площадка зондирования и специализированная установка [85]	48
Рисунок 27 — Принципиальная схема электрической установки статического зондирования [85, 87, 88].....	49
Рисунок 28 — Результаты статического зондирования с описанием грунта, полученные Р. Фортье [85]	51
Рисунок 29 — Диаграммы оценки поведенческого типа грунта [85].....	53
Рисунок 30 — Оборудование для статического зондирования на базе тяжелого трактора, смонтированное на навесное устройство [90, 91].....	55
Рисунок 31 — Среднее сопротивление наконечника и муфты трения зонда, полученные с учетом измеренной плотности снега в шурфе [91].....	55
Рисунок 32 — Общий вид площадки исследования (фото автора).....	60
Рисунок 33 — График статического зондирования с измерением температуры, выполненный на опытной площадке	61
Рисунок 34 — Этапы установки обсадной трубы в термометрическую скважину, 1-я минута (фото автора).....	63
Рисунок 35 — Этапы установки обсадной трубы в термометрическую скважину, 3-я минута (фото автора).....	64
Рисунок 36 — Этапы установки обсадной трубы в термометрическую скважину, 5-я минута (фото автора).....	64
Рисунок 37 — Вид термокосы GeoPrecision [44]	65
Рисунок 38 — Номограмма погрешности измерения температур устройством GeoPrecision [44]	65
Рисунок 39 — Сбор данных термометрии (фото автора).....	66
Рисунок 40 — Экран терминала сбора данных во время замера температуры в полевых условиях	68
Рисунок 41 — Изменение температуры датчика зонда во времени.....	68

Рисунок 42 — Стационарный режим температуры грунта при замере зондом статического зондирования	69
Рисунок 43 — График замера температуры в соответствии с разработанной методикой.....	69
Рисунок 44 — Квазистационарный режим замера температуры грунта при замере зондом статического зондирования в соответствии с разработанной методикой	70
Рисунок 45 — Соотношение доверительных интервалов, случай типа А	71
Рисунок 46 — Соотношение доверительных интервалов, случай типа Б.....	72
Рисунок 47 — Графики пересечения доверительных интервалов замеров температуры на глубине 2,0-5,5 м	73
Рисунок 48 — Графики пересечения доверительных интервалов замеров температуры на глубине 6,0-11,0 м	74
Рисунок 49 — Кривая релаксации напряжения [15].....	77
Рисунок 50 — Схема кривой релаксации напряжений (а) и ее интерпретация (б) [22].....	78
Рисунок 51 — Пример обработки данных лобового сопротивления логарифмической функцией	82
Рисунок 52 — Пример обработки данных сопротивления вдоль боковой поверхности логарифмической функцией.....	83
Рисунок 53 — Пример обработки данных лобового сопротивления степенной функцией	84
Рисунок 54 — Пример обработки данных сопротивления вдоль боковой поверхности степенной функцией.....	85
Рисунок 55 — Пример обработки данных лобового сопротивления дробно-линейной функцией	86
Рисунок 56 — Пример обработки данных сопротивления вдоль боковой поверхности дробно-линейной функцией.....	86
Рисунок 57 — Пример обработки кривой релаксации лобового сопротивления по предлагаемой методике, где а — кривая релаксации напряжения, получаемая в полевых условиях; б — линеаризация кривой в обратных и логарифмических координатах; в — расчетные значения длительной прочности, полученные путем решения логарифмического уравнения длительной прочности [11]	93
Рисунок 58 — Полевой замер релаксации напряжения в мерзлом грунте (время замера – 1 мин.)	95
Рисунок 59 — Полевой замер релаксации напряжения в мерзлом грунте (время замера – 11 мин.).....	96
Рисунок 60 — Полевой замер релаксации напряжения в мерзлом грунте (время замера – 16 мин.).....	97

Рисунок 61 — Геологический разрез четвертичных отложений через р. Обь в районе г. Салехард [4].....	100
Рисунок 62 — Расположение опытных площадок исследований на карте-схеме распространения многолетнемерзлых грунтов [96] на исследуемой территории (описание в тексте, составлено автором).....	103
Рисунок 63 — Профиль статического зондирования на Гыданском полуострове, песок твердомерзлый (данные автора)	104
Рисунок 64 — Литологическая колонка четвертичных отложений в г. Салехард, совмещенная с графиком статического зондирования (составлено автором).....	109
Рисунок 65 — Сравнение расчетных методов по статическому зондированию с натурным испытанием сваи статической нагрузкой (составлено автором).....	113
Рисунок 66 — Неравномерная осадка здания Ямальского полярного агроэкономического техникума (фото автора).....	116
Рисунок 67 — Трещина во внешней стене здания Ямальского полярного агроэкономического техникума (фото автора).....	117
Рисунок 68 — Расположение точек статического зондирования (ТСРТ), термостабилизаторов (ТС) и свай [50].....	118
Рисунок 69 — Мобильная установка статического зондирования во время испытания ТСРТ-04 (фото автора).....	118
Рисунок 70 — Выделение ИГЭ на основе данных по статическому зондированию и бурению	120
Рисунок 71 — Схема расположения свай, термостабилизаторов (ТС) и точек статического зондирования (ТСРТ).....	121
Рисунок 72 — Замеренная температура грунтов в точках ТСРТ-01, ТСРТ-02 и ТСРТ-04.	122
Рисунок 73 — Зависимость температуры, лобового сопротивления q_c и бокового трения f_s от глубины для глинистого грунта, слабльдистого (ИГЭ-03)	125
Рисунок 74 — Зависимость температуры, лобового сопротивления q_c и бокового трения f_s от глубины для глинистого грунта, льдистого (ИГЭ-04).....	126
Рисунок 75 — Деформации железнодорожного полотна (фото автора)	128
Рисунок 76 — Установка статического зондирования (монопод) на платформе путеизмерительного состава (фото автора).....	130
Рисунок 77 — График статического зондирования на железнодорожном полотне.....	130
Рисунок 78 — Профиль статического зондирования совмещенный с геологической колонкой	131

СПИСОК ТАБЛИЦ

Таблица 1 — Разновидности состояния незасоленных мерзлых грунтов в соответствии с ГОСТ 25100-2011 [70].....	11
Таблица 2 — Измеренная температура грунта в ходе сравнительных испытаний (составлено автором).....	71
Таблица 3 — Коэффициенты линейных уравнений длительной прочности и величина достоверности линейной аппроксимации для σ_c и σ_s логарифмической функции (составлено автором).....	89
Таблица 4 — Коэффициенты линейных уравнений длительной прочности и величина достоверности линейной аппроксимации для σ_c и σ_s степенной функции (составлено автором).....	90
Таблица 5 — Коэффициенты линейных уравнений длительной прочности и величина достоверности линейной аппроксимации для σ_c и σ_s дробно-линейной функции (составлено автором).....	91
Таблица 6 — Сравнение опытных значений длительной прочности песчаных и глинистых грунтов на сжатие и сдвиг с рекомендованными значениями R и R_{af} в СП 25.13330.2012 (составлено автором)	106
Таблица 7 — Сравнение значений срыва муфты зонда после смерзания с массивом грунта со значениями среза по поверхности смерзания со сталью R_{af} по лабораторным данным (составлено автором)	106
Таблица 8 — Значения несущей способности сваи, рассчитанные для интервала 10 дней по данным трех уравнений длительной прочности (составлено автором).....	110
Таблица 9 — Значения несущей способности сваи, рассчитанные для интервала 100 лет по данным трех уравнений длительной прочности (составлено автором).....	111
Таблица 10 — Замеренная температура грунтов в точках ТСРТ-01, ТСРТ-02 и ТСРТ-04 (составлено автором)	123
Таблица 11 — Результаты расчета несущей способности сваи по различным методикам (составлено автором)	127
Таблица 12 — Классификация состояния мерзлого грунтового основания по отношению к свайным фундаментам (составлено автором)	133
Таблица 13 — Геотехнический мониторинг на основе технологии статического зондирования (составлено автором)	136