

**ПРАВИТЕЛЬСТВО МОСКВЫ
КОМПЛЕКС ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПОЛИТИКИ И
СТРОИТЕЛЬСТВА ГОРОДА МОСКВЫ**

**РУКОВОДСТВО
ПО КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА СКРЫТЫХ РАБОТ
ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ
ОБЪЕКТОВ, ВКЛЮЧАЯ ОБЪЕКТЫ МЕТРОПОЛИТЕНА,
НА ТЕРРИТОРИИ МОСКВЫ**

Москва 2021

ПРАВИТЕЛЬСТВО МОСКВЫ
КОМПЛЕКС ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПОЛИТИКИ И
СТРОИТЕЛЬСТВА ГОРОДА МОСКВЫ

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель Мэра Москвы
в Правительстве Москвы по вопросам
градостроительной политики и
строительства


_____ **А.Ю. Бочкарев**

«23» июня 2021 г.

**РУКОВОДСТВО
ПО КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА СКРЫТЫХ РАБОТ
ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ
ОБЪЕКТОВ, ВКЛЮЧАЯ ОБЪЕКТЫ МЕТРОПОЛИТЕНА,
НА ТЕРРИТОРИИ МОСКВЫ**

СОГЛАСОВАНО

Руководитель Департамента
градостроительной политики
города Москвы


_____ **С.И. Лёвкин**

«11» июня 2021 г.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ	7
2. НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	8
3. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	9
4. ВИДЫ ОБСЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ	11
4.1 ОДИНОЧНЫЕ БУРОНАБИВНЫЕ СВАИ	11
4.2 ОДИНОЧНЫЕ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫЕ СВАИ	13
4.3 «СТЕНЫ В ГРУНТЕ» ТРАНШЕЙНОГО И СВАЙНОГО ТИПА	15
4.4 ГРУНТОЦЕМЕНТНЫЕ МАССИВЫ	17
4.5 ЗАОБДЕЛОЧНОЕ ПРОСТРАНСТВО ТОННЕЛЕЙ	18
4.6 ГРУНТОВЫЕ МАССИВЫ ПРИ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКЕ	20
5. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОДИНОЧНЫХ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ	23
5.1 СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД	23
5.1.1 Методика проведения работ	23
5.1.2 Подготовка к проведению испытаний	26
5.1.3 Аппаратура	26
5.1.4 Обработка данных	27
5.1.5 Интерпретация данных	28
5.2 УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД	30
5.2.1 Методика проведения работ	30
5.2.2 Подготовка к проведению испытаний	33
5.2.3 Аппаратура	34
5.2.4 Обработка данных	35
5.2.5 Интерпретация данных	35
5.3.1 Методика проведения работ	37
5.3.2 Подготовка к проведению испытаний	39
5.3.3 Аппаратура	39
5.3.4 Обработка данных	39
5.3.5 Интерпретация данных	40
5.4 ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ МЕТОДОВ	42
6. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОДИНОЧНЫХ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫХ СВАЙ	44
6.1 СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ КАРОТАЖ	44
6.1.1 Методика проведения работ	44
6.1.2 Подготовка к проведению испытаний	46
6.1.3 Аппаратура	46
6.1.4 Обработка данных	47
6.1.5 Интерпретация данных	47

6.2	ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ МЕТОДА	48
7.	КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА «СТЕН В ГРУНТЕ» ТРАНШЕЙНОГО И СВАЙНОГО ТИПА	49
7.1	УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД	49
7.1.1	Методика проведения работ	49
7.1.2	Подготовка к проведению испытаний	49
7.1.3	Аппаратура	50
7.1.4	Обработка данных	50
7.1.5	Интерпретация данных	50
7.2	МЕЖСКВАЖИННЫЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРОЗВУЧИВАНИЯ	50
7.2.1	Методика проведения работ	50
7.2.2	Подготовка к проведению испытаний	50
7.2.3	Аппаратура	51
7.2.4	Обработка данных	51
7.2.5	Интерпретация данных	51
7.3	ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД	51
7.3.1	Методика проведения работ	51
7.3.2	Подготовка к проведению испытаний	51
7.3.3	Аппаратура	51
7.3.4	Обработка данных	51
7.3.5	Интерпретация данных	52
7.4	СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД	52
7.4.1	Методика проведения работ	52
7.4.2	Подготовка к проведению испытаний	53
7.4.3	Аппаратура	53
7.4.4	Обработка данных	53
7.4.5	Интерпретация данных	53
7.5	ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ МЕТОДОВ	54
8.	КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ГРУНТОЦЕМЕНТНЫХ МАССИВОВ	55
8.1	СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ КАРТАЖ	55
8.1.1	Методика проведения работ	55
8.1.2	Подготовка к проведению испытаний	55
8.1.3	Аппаратура	55
8.1.4	Обработка данных	55
8.1.5	Интерпретация данных	55
8.2	МЕЖСКВАЖИННЫЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРОЗВУЧИВАНИЯ	55
8.2.1	Методика проведения работ	55
8.2.2	Подготовка к проведению испытаний	57
8.2.3	Аппаратура	57
8.2.4	Обработка данных	57
8.2.5	Интерпретация данных	58

8.3 ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ МЕТОДОВ	58
9. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТАМПОНАЖА ЗАОБДЕЛОЧНОГО ПРОСТРАНСТВА ТОННЕЛЕЙ	59
9.1 АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД	59
9.1.1 Методика проведения работ.....	59
9.1.2 Подготовка к проведению испытаний.....	61
9.1.3 Аппаратура.....	61
9.1.4 Обработка данных.....	61
9.1.5 Интерпретация данных	62
9.2 ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ	64
9.2.1 Методика проведения работ.....	64
9.2.2 Подготовка к проведению испытаний.....	64
9.2.3 Аппаратура.....	64
9.2.4 Обработка данных.....	64
9.2.5 Интерпретация данных	65
10. ПРОВАЛЫ И РАЗУПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА ПРИ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКЕ	67
10.1 НАЗЕМНАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА	67
10.1.1 Методика проведения работ.....	67
10.1.2 Подготовка к проведению испытаний.....	75
10.1.3 Аппаратура.....	76
10.1.4 Обработка данных.....	77
10.1.5 Интерпретация данных	80
10.2 ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ	81
10.2.1 Методика проведения работ.....	81
10.2.2 Подготовка к проведению испытаний.....	84
10.2.3 Аппаратура.....	85
10.2.4 Обработка данных.....	85
10.2.5 Интерпретация данных	88
10.3 ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ МЕТОДОВ	90
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	91
ПРИЛОЖЕНИЕ А. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА	97
А.1 Аппаратура для наземных сейсмоакустических измерений.....	97
А.2 Аппаратура для скважинных сейсмоакустических измерений.....	101
А.3 Аппаратура для скважинных ультразвуковых измерений.....	107
А.4 Аппаратура для наземной георадиолокации	110
А.5 Аппаратура для скважинных термометрических измерений	111
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СВОДНАЯ ТАБЛИЦА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ	113

Введение

Настоящее «Руководство по контролю качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве подземных объектов, включая объекты метрополитена, на территории Москвы» (далее - Руководство) разработано по заказу Департамента градостроительной политики города Москвы (государственный контракт от 14.09.2020 г. № ДГП-20-28-Р) в развитие нормативных документов по применению геофизических методов для контроля качества объектов подземного строительства и решения задач, возникающих при выполнении работ нулевого цикла.

В последнее десятилетие в Москве и ряде других мегаполисов страны кратно выросла интенсивность строительства подземных сооружений инфраструктурного (транспортного, производственного, коммунального и др.) назначения. При этом растёт приоритет обеспечения контроля качества выполняемых работ и повышения достоверности результатов изысканий. Актуальность данной задачи определяется перспективами отрасли капитального строительства страны и необходимостью следовать требованиям Федерального закона от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» об обеспечении контроля за «проектными значениями параметров зданий и сооружений и качественными характеристиками в течение всего жизненного цикла зданий или сооружений».

Проблема, неизбежно возникающая при привлечении геофизических методов в качестве косвенных методов контроля – слабая разработка нормативно-технической стороны подобных изысканий и практически полное отсутствие стандартизации даже для регулярно и массово используемых методик. Невозможность использования некоторых методов вне рамок опытно-методических работ существенно ограничивает накопление информации о возможностях их применения и перспективах в решении задач, возникающих при строительстве подземных объектов. Неосведомлённость проектировщиков и представителей строительных организаций о необходимой подготовке конструкций к проведению испытаний и об ограничениях используемых методов – ещё одно слабое звено в цепи организации контроля качества.

Разработанное на основе анализа имеющихся нормативных документов, справочно-методических пособий и литературных источников, настоящее Руководство направлено на повышение эффективности контрольных испытаний, выполняемых с использованием геофизических методов, применимых для строительства и эксплуатации подземных сооружений транспортного назначения в Москве.

В качестве основы для разделов «Контроль качества одиночных буронабивных свай», «Контроль качества «стен в грунте» траншейного и свайного типа» были использованы Стандарты организации ООО «ЭГЕОС» СТО ЭГЕОС 1–1.2–001–2017; СТО ЭГЕОС 1-1.1-001—2018; СТО ЭГЕОС 1–1.3–001–2017 (авторы – Мухин А.А., Лозовский И.Н., Чуркин А.А.), опубликованные в журнале «Геотехника» (№№ 3-4 за 2019 г., № 1 за 2020 г.), и международные стандарты ASTM D5882–16 «Standard test method for low strain impact integrity testing of deep foundations», ASTM D6760–16 «Standard test method for integrity testing of concrete deep foundations by ultrasonic crosshole testing», ASTM D7949–14 «Standard test methods for thermal integrity profiling of concrete deep foundations».

В качестве основы для разделов «Контроль качества одиночных грунтоцементных свай», «Контроль качества грунтоцементных массивов», «Провалы и разуплотнения грунтового массива при щитовой проходке» использованы международные стандарты ASTM D7400–19 «Standard test methods for downhole seismic testing», ASTM D6432–19 «Standard guide for using the surface ground penetrating radar method for subsurface investigation».

Содержащиеся в настоящем Руководстве общие положения, требования к методике проведения и подготовке к испытаниям, оборудованию, алгоритмам обработки и интерпретации данных прошли производственную проверку при строительстве и эксплуатации подземных объектов в Москве и других городах.

Положения Руководства могут быть использованы при применении геофизических методов для контроля качества подземных сооружений в других регионах страны.

Руководство разработано авторским коллективом в составе:

от **ООО «СпецГеоТрансПроект»**: к.ф.-м.н. В.В. Капустин, к. т. н. А.А. Чуркин;

от **МГУ им. М.В. Ломоносова**: д.ф.-м.н., проф. М.Л. Владов;

от **Горного института НИТУ «МИСиС»**: к.т.н., доц. В.В. Набатов, к.т.н., доц. Р.М. Гайсин, к.т.н. П.В. Николенко.

1. Область применения

1.1 Настоящее Руководство предназначено для учёта при проектировании и строительстве подземных сооружений и распространяется на контроль качества одиночных буронабивных свай, одиночных грунтоцементных свай, «стен в грунте» траншейного и свайного типа, грунтоцементных массивов, тампонажа заобделочного пространства тоннелей и провалов и разуплотнений грунтового массива при щитовой проходке.

1.2 Руководство устанавливает правила выбора геофизических методов для решения задач контроля и обследования подземных сооружений, требования к методике проведения испытаний, необходимым подготовительным работам, применяемой аппаратуре, обработке и интерпретации данных.

1.3 Положения настоящего Руководства дополняют и развивают существующую нормативно-техническую документацию применительно к контролю качества подземных сооружений и опираются на требования сводов правил, других нормативных и методических документов по обследованию зданий и сооружений.

2. Нормативные ссылки

В настоящем Руководстве использованы ссылки на следующие нормативные документы:

Федеральный закон Российской Федерации от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

ГОСТ 27751-2014 Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения.

ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

ГОСТ Р 57208-2016 Тоннели и метрополитены. Правила обследования и устранения дефектов и повреждений при эксплуатации.

ГОСТ 25192-2012 Бетоны. Классификация и общие технические требования.

ГОСТ 28570-90 Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций.

ГОСТ 17624-2012 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.

ГОСТ Р ИСО 5577-2009. Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Словарь.

СП 248.1325800.2016 Сооружения подземные. Правила проектирования.

СП 120.13330.2012 Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 (с Изменениями № 1 – 4).

СП 122.13330.2012 Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-97 (с Изменением № 1).

СП 13-102-2003 Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений.

СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83.

СП 24.13330.2020 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85.

СП 45.13330.2017 Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87.

СП 46.13330.2012 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 3.06.04-91.

СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96.

СП 50-102-2003 Проектирование и устройство свайных фундаментов.

СП 70.13330.2012 Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87.

СП 291.1325800.2017 Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования.

3. Термины и определения

В тексте используются следующие термины и определения*:

Сплошность сваи – характеристика материала железобетонной сваи, характеризующая однородность свойств бетона конструкции. Нарушение сплошности – сужение ствола сваи, наличие в свае пустот, каверн, трещин, включений инородного материала.

Дефект – отдельное несоответствие конструкции сваи какому-либо параметру, установленному проектом или нормативным документом.

Акустическая жёсткость R – параметр, характеризующий волновое сопротивление материала (грунт, бетон, грунтоцемент), $R = \rho \times V$, где ρ – плотность материала, V – скорость упругой волны.

Импеданс материала, акустический импеданс Z – параметр, характеризующий волновое сопротивление поперечного сечения сооружения, вовлечённого в колебательный процесс, $Z = \rho \times V \times S$, где ρ – плотность материала, V – скорость упругой волны в теле конструкции (стержневой – для сваи, пластинчатой – для «стены в грунте», продольной или поперечной – для грунтоцементной сваи (ГЦС) или закреплённого массива грунтов), S – площадь поперечного сечения, вовлечённого в колебательный процесс.

Ударный источник – молоток или иной инструмент с известным весом и материалом бойка, используемый для возбуждения сейсмического сигнала.

Полезный сигнал – сигнал, содержащий информацию о контролируемом в ходе проведения испытаний параметре изучаемой среды.

Помеха (шум) – изменение амплитуды зарегистрированного сигнала, которое не интерпретируется в качестве полезного сигнала.

Отношение сигнал/помеха – величина, равная отношению мощности полезного сигнала к мощности помех.

Акустическая аномалия – значительное изменение амплитуды / частотного состава сигнала, которое не интерпретируется в качестве импульса, соответствующего отражению от ожидаемой геометрической структуры изучаемой среды (нижнему торцу сваи или «стены в грунте», геологической границе, границе «обделка-грунт» и т.д.). Акустическая аномалия может свидетельствовать о наличии заметной неоднородности.

Ультразвуковая аномалия – значительное локальное отклонение значений параметров ультразвукового сигнала от нормы.

Температурная аномалия – значительное локальное отклонение значений температурного профиля от нормы.

Эффективный радиус буронабивной сваи (термометрический метод) – условная величина, основной расчётный показатель сплошности бетона сваи по данным термометрического метода. В каждой точке измерения эффективный радиус численно равен радиусу условного цилиндрического однородного бетонного тела, имеющего свойства, соответствующие средним свойствам бетона испытываемой сваи, выделяющего при твердении бетона количество тепла, эквивалентное измеренной температуре.

Эффективный радиус грунтоцементной сваи (сейсмоакустический каротаж) – условная величина, основной расчётный показатель диаметра грунтоцементной сваи (ГЦС) по данным сейсмоакустического каротажа. В каждой точке измерения эффективный радиус численно равен радиусу условного цилиндрически однородного грунтоцементного тела,

имеющего свойства, соответствующие средним свойствам материала испытываемой сваи, и определяется с применением спектрального анализа зарегистрированной в теле ГЦС продольной волны.

Время первого вступления – минимальное время, требуемое передаваемому импульсу для достижения приёмника.

Затухание – снижение энергии сигнала при распространении волны в материале, вызванное процессами поглощения и рассеяния.

Обработка данных – совокупность процедур, направленных на повышение соотношения сигнал/помеха и подготовку данных к интерпретации.

Интерпретация данных – анализ зарегистрированных данных с целью получения выводов о состоянии изучаемого подземного сооружения / грунтового массива.

Трубы доступа – стальные или полимерные трубы, устанавливаемые в бетон сваи для проведения контроля сплошности бетона.

База измерения (ультразвуковой метод) – расстояние между образующими цилиндров ультразвуковых преобразователей.

Точка измерения – место, в котором проводят единичное возбуждение и приём сигнала, определяемое положением источников и приёмников колебаний и идентификаторами труб доступа, между которыми проведено измерение.

Контролируемая область – часть конструкции / объёма среды, которая подвергается контролю.

Профиль измерений – совокупность сигналов или их параметров, зарегистрированных для одной пары труб доступа при различной глубине погружения датчиков.

Временной разрез – монтаж функций времени откликов среды на импульсное воздействие в георадиолокации или сейсморазведке, собранный из записей на каждом пикете профиля наблюдений.

Ось синфазности – область на временном разрезе, где импульсы отражённой или дифрагированной волн сдвинуты по времени не более чем на $\frac{1}{4}$ видимого периода.

Гидроволна (волна Стоунли) – волна поверхностного типа, распространяющаяся по околоскважинному пространству водонаполненной скважины при возбуждении волны давления в скважине.

Антенна (георадиолокация) – преобразователь электрического импульса, возбуждаемого блоком управления, в электромагнитную волну определённой центральной частоты (излучающая антенна); преобразователь принимаемого электромагнитного отклика среды в электрический импульс, передающийся на блок управления (приёмная антенна).

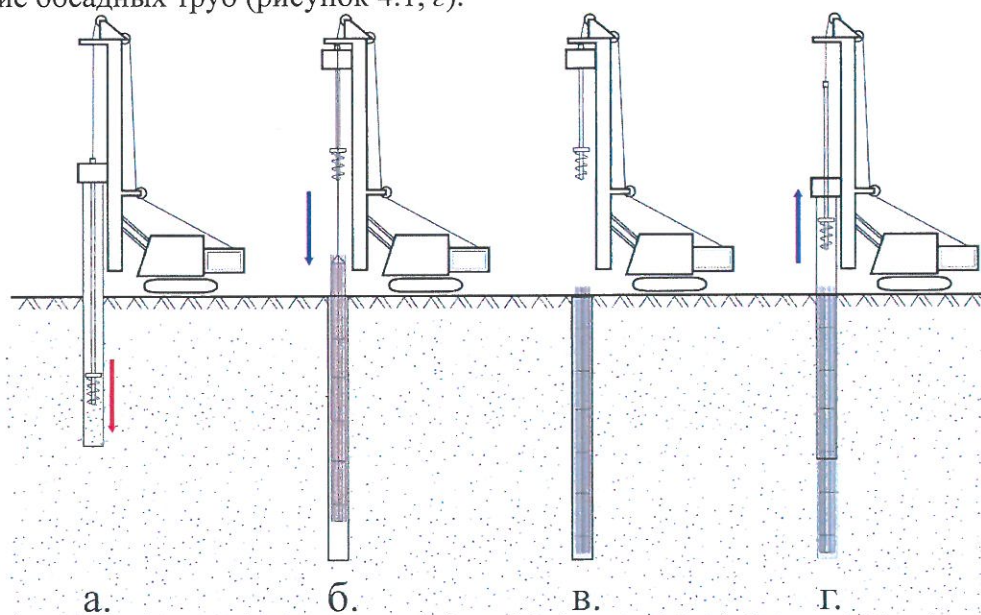
* Представленные Термины и определения основаны на формулировках ГОСТ Р ИСО 5577-2009, СТО ЭГЕОС 1-1.2-001-2017; СТО ЭГЕОС 1-1.1-001-2018; СТО ЭГЕОС 1-1.3-001-2017.

4. Виды обследуемых объектов

4.1 Одиночные буронабивные сваи

Буронабивные сваи (БНС) широко используются при сооружении фундаментов благодаря возможности варьировать параметры (длину и диаметр, класс бетона) конструкции в зависимости от поставленных задач. Наиболее распространённые виды БНС – бетонированные в скважинах под защитой обсадных инвентарных труб и изготавливаемые с использованием непрерывного полого шнека.

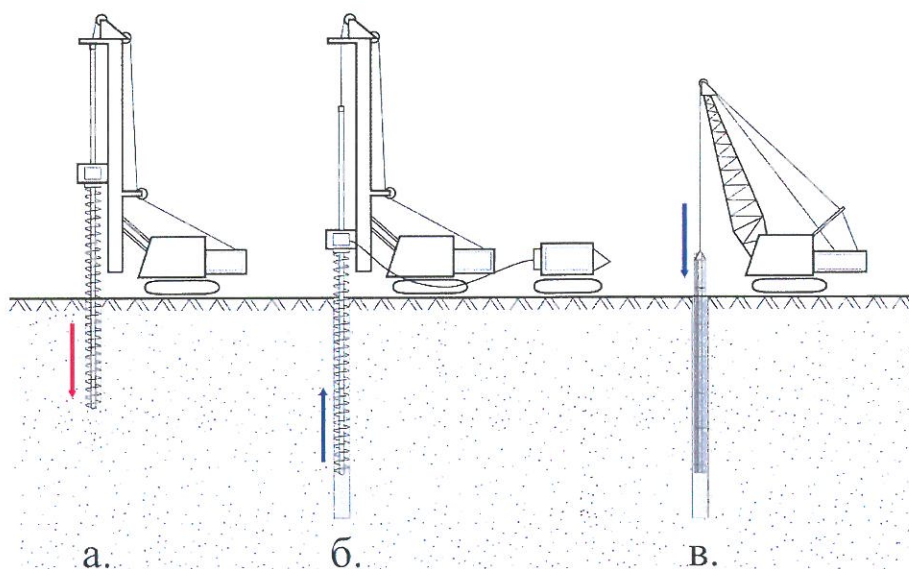
Грунтовые условия часто являются определяющим фактором при выборе технологии изготовления БНС. При работе в водонасыщенных и склонных к перемещению грунтах используют инвентарные обсадные трубы, под защитой которых возводится конструкция. По мере погружения трубы буровым инструментом из неё извлекается грунт, после чего наращиваются новые секции трубы (рисунок 4.1, а). В обсаженную скважину опускается арматурный каркас (рисунок 4.1, б), центрируемый относительно оси сваи, после чего выполняют бетонирование (рисунок 4.1, в). Затем производится посекционное извлечение обсадных труб (рисунок 4.1, г).



а – погружение обсадных труб, сопровождающееся извлечением грунта; б – установка арматурного каркаса; в – бетонирование скважины; г – извлечение обсадных труб

Рисунок 4.1 – Изготовление БНС под защитой обсадных труб

Устройство буронабивных свай методом СФА заключается в использовании в качестве бурового инструмента полого шнека с забурником, уплотняющего и извлекающего грунт при прохождении через грунтовую толщу (рисунок 4.2, а). Бетон подаётся в полость шнековой колонны с помощью бетононасоса. При подаче бетона производится извлечение шнека, сопровождающееся формированием профиля сваи (рисунок 4.2, б). Параметры заполнения скважины бетоном и извлечения шнека контролируются бортовыми компьютерами, регистрирующими давление подаваемого бетона и скорость вращения и продвижения бура. В скважину погружается арматурный каркас (рисунок 4.2, в), оснащённый центраторами.



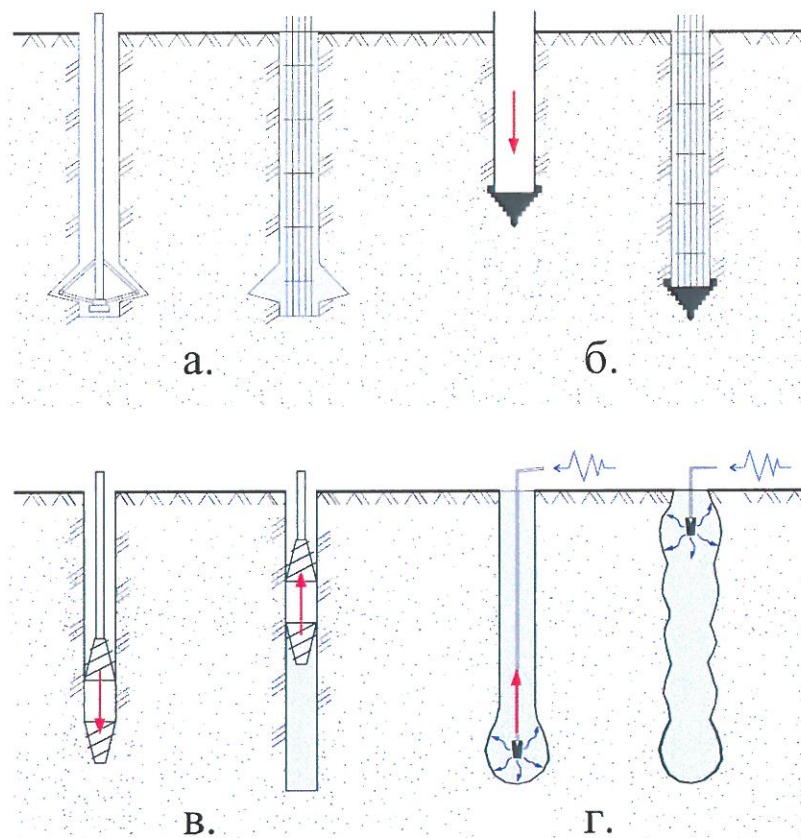
а – погружение шнека; б – бетонирование сваи одновременно с извлечением шнека; в – погружение арматурного каркаса

Рисунок 4.2 – Изготовление БНС методом СФА

Существуют технологии изготовления БНС, в которых рост несущей способности свай достигается не в результате увеличения глубины заложения или размеров сечения, а посредством различных технических решений.

Распространены сваи с уширением в нижней части. Уширение изготавливается с использованием специальных приспособлений и приёмов: буров-расширителей, статических вдавливателей, уширителей пантографного типа, камуфлетных взрывов и др. (рисунок 4.3, *а*). При изготовлении БНС с теряемым наконечником (Fundex- и Atlas-сваи) на конце обсадной трубы крепят чугунный винтовой «башмак», уплотняющий слои грунта вокруг обсадки скважины при погружении труб (рисунок 4.3, *б*). Устройство БНС с раскатчиком (DDS-сваи) заключается в постепенном уплотнении скважины без выемки грунта специальным буровым инструментом (раскатчиком). Извлечение раскатчика производится с одновременной закачкой бетонной смеси (рисунок 4.3, *в*).

Буроинъекционные сваи (БИС) – подкласс буронабивных свай, часто выделяемый в отдельную группу. Обычно это сваи, изготавливаемые в скважинах малого (до 350 мм) диаметра, с помощью нагнетания в них цементного раствора под большим давлением через полый шнек или иной иньектор. Буроинъекционные сваи используются при работах в городской черте в условиях ограниченного пространства, применяют при укреплении и реконструкции существующих сооружений. Среди технологий изготовления БИС выделяются сваи-РИТ. Уплотнение вмещающих грунтов в этом случае производится путём обработки скважины по разрядно-импульсной технологии, позволяющей создавать сваи с многочисленными камуфлетными уширениями ствола (рисунок 4.3, *г*).



а – с уширенной пятой; б – свая с теряемым наконечником; в – свая-DDS; г – свая-ПИТ

Рисунок 4.3 – Технологии изготовления БНС с повышенной несущей способностью

Дефекты свайных фундаментов представляют собой несоответствия каких-либо параметров конструкции требованиям проекта: искажения геометрии (несоответствие фактических глубины залегания, размеров поперечного сечения и т.п.), отклонение характеристик материала от установленных проектной документацией (снижение класса прочности бетона, замещение бетона сторонними материалами). Дефекты приводят к снижению несущей способности и долговечности конструкций и возникновению осадок и деформаций сооружений, которые требуют дорогостоящих капитальных ремонтов.

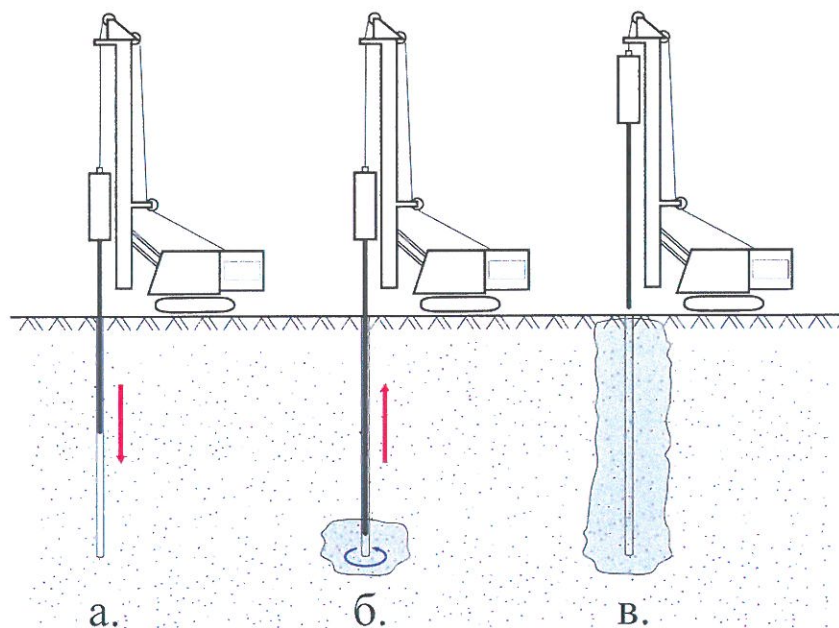
Основной причиной возникновения дефектов являются нарушения в технологическом процессе: неблагоприятные грунтовые условия, некачественные строительные материалы, отсутствие компетентного технического контроля, низкая квалификация или халатность строителей. Прямые методы контроля за процессом изготовления конструкции часто не позволяют предупредить возникновение дефектов.

4.2 Одиночные грунтоцементные сваи

Технология устройства грунтоцементных свай TurboJet с применением струйной цементации широко используется для решения ряда задач: усиления фундаментов сооружений и укрепления бортов котлованов и дорожного полотна, повышение устойчивости откосов сваями-шпонками, закрепления массивов грунтов.

Опускаемый в предварительно пробурённую лидерную скважину иньектор (рисунок 4.4, а) использует энергию высоконапорной струи цементного раствора для одновременного разрушения и перемешивания грунта с цементным раствором прямо на месте – «mix-in-place» в международной терминологии (рисунок 4.4, б). После твердения

раствора образуется новый материал – грунтобетон, обладающий более высокими деформационными и прочностными характеристиками, чем вмещающий грунт (рисунок 4.4, в).



а – бурение лидерной скважины и погружение инъеکتора до проектной отметки; б – подача цементующей смеси под давлением одновременно с извлечением инъеکتора; в – формирование тела грунтоцементной сваи

Рисунок 4.4 – Изготовление ГЦС

Преимуществами рассматриваемой технологии устройства свай считаются высокая предсказуемость результатов укрепления грунтов и возможность расчёта геометрических и прочностных характеристик создаваемых конструкций. В рамках развития описываемого направления получено достаточно результатов: обобщённые зависимости пределов прочности на сжатие материала сваи от количества цемента на один кубометр сваи для литологических и гранулометрических разностей несвязных грунтов от глин до гравия; подтверждаемые в ряде случаев расчётами диаметра сваи в зависимости от типа грунта и технологических параметров изготовления сваи.

Ряд факторов существенно влияет на прочностные характеристики и на диаметр изготовленной сваи (действие этих факторов может привести к результату, весьма далёкому от расчётного):

- наличие/отсутствие воды в разрезе – степень водонасыщенности пород, положение уровня грунтовых вод или полного влагонасыщения;
- степень неоднородности грунта по латерали и вертикали чрезвычайно высока в условиях техногенных грунтов городских агломераций;
- неравномерное твердение различных участков тела сваи в зависимости от гранулометрии, обводнённости, диаметра сваи, положения сваи в массиве грунтов и температуры.

На объектах с большим количеством свай растёт необходимость обследования определённого процента изготовленных свай. Одной из проблем оценки качества результата устройства свай является определение предела прочности материала, распределение этого параметра по стволу сваи и оценка диаметра ГЦС по всей длине.

Прямые и наиболее распространённые методы определения этих параметров основаны на разбуривании подлежащей диагностике сваи по оси и на нескольких

расстояниях по радиусу от оси (для оценки диаметра ГЦС) с отбором керна (для определения предела прочности). Этот прямой метод контроля характеризуется высокой стоимостью и затратами по времени и не позволяет провести интегральную оценку качества большого числа свай, и поэтому не свободен от ошибок.

Определение предела прочности по керну представляет собой дифференциальную оценку и относится к данной точке тела сваи, не позволяет получить интегральную характеристику состояния материала конструкции. Определение диаметра сваи по результатам бурения скважин может дать предельные оценки диаметра сваи по тому, на каком расстоянии от оси получен ещё материал сваи, а на каком – уже грунт, но в отсутствие инклинометрии невозможно правильно позиционировать несколько скважин на расстоянии в первые десятки сантиметров друг от друга в теле сваи при её длине 10 м и более.

Другой прямой способ оценки диаметров и формы сваи – непосредственные измерения после откапывания. Однако этот способ можно применять далеко не всегда, даже на опытных сваях, например, при укреплении уже имеющихся оснований.

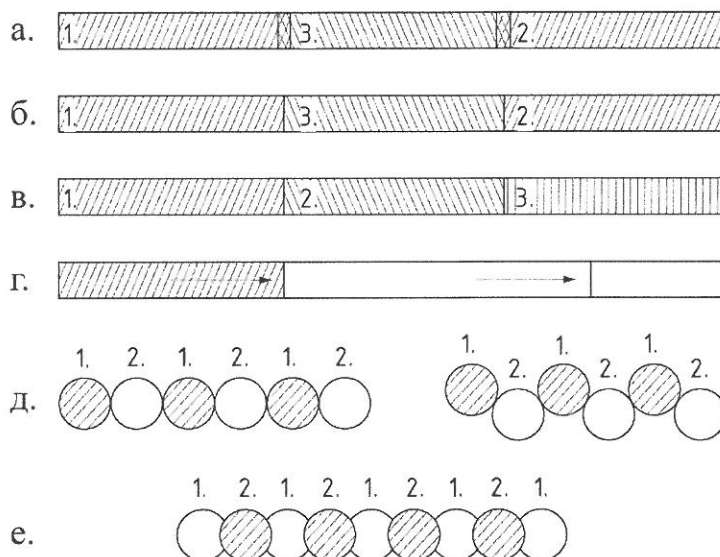
Таким образом, во всех перечисленных случаях способы прямых измерений требуют больших затрат при отмеченной степени достоверности результата. Кроме того, указанные прямые способы определения прочностных характеристик и формы свай являются одномоментными и уже не могут быть повторены через некоторое время.

4.3 «Стены в грунте» траншейного и свайного типа

«Стены в грунте» – долговременные ограждающие конструкции, которые выполняют как функции противофильтрационных завес, так и функции фундаментов. «Стены в грунте» используются в широком диапазоне грунтовых условий, комбинируются с грунтоцементными элементами, анкерными и распорными креплениями и др. конструкциями. По способу сооружения «стены в грунте» разделяются на сооружаемые траншейным способом (ТСГ) и свайные (ССГ), выполняемые из свай буросекущих (БСС) или бурокасательных (БКС).

Траншейные «стены в грунте» сооружаются последовательным изготовлением отдельных секций (захваток) длиной 2-6 м. В зависимости от порядка изготовления захваток они подразделяются на:

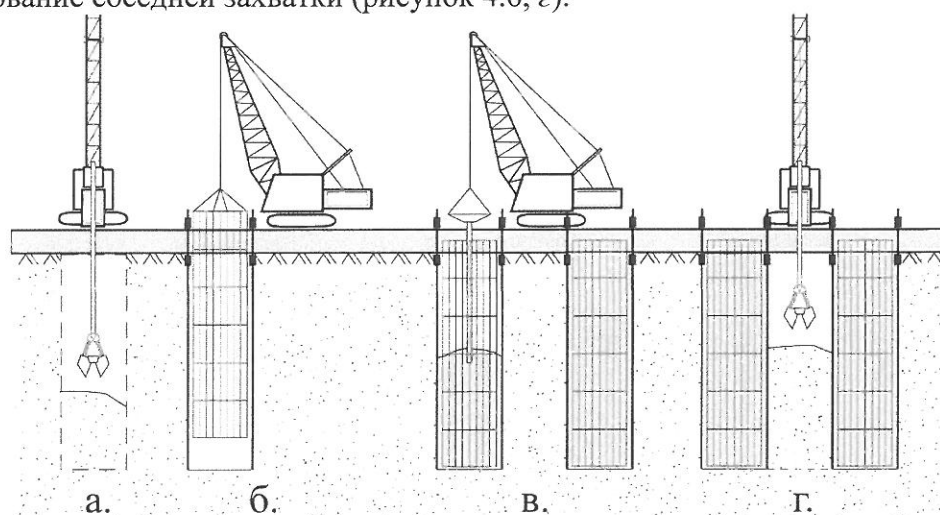
- бетонированные в шахматном порядке, с подрезкой бетона забетонированных в первую проходку захваток (рисунок 4.5, а);
- бетонированные в шахматном порядке, с образованием шва между захватками с помощью разделительных конструкций (рисунок 4.5, б);
- последовательно бетонированные с образованием шва (рисунок 4.5, в);
- изготавливаемые с непрерывным заполнением траншеи бетонной смесью (рисунок 4.5, г).



1, 2, 3 – последовательность изготовления элементов сооружения; → - направление разработки и бетонирования траншеи; а – ТСГ с пересекающимися секциями; б – ТСГ с касающимися секциями с образованием шва; в – ТСГ с последовательным заполнением захваток; г – ТСГ с непрерывным заполнением захваток; д – БКС; е – БСС

Рисунок 4.5 – Типовые схемы устройства «стен в грунте»

Форшахты сохраняют проектное направление разработки грунта и предотвращают обрушение бортов траншеи. Разработка траншеи осуществляется грейфером (в мягких грунтах) или гидравлической фрезой (в твёрдых грунтах) (рисунок 4.6, а) под защитой бентонитового раствора. После зачистки дна захватки в неё устанавливают ограничители – инвентарные или постоянные элементы, используемые для формирования стыков между захватками. В разработанную траншею под защитой ограничителя опускают арматурный каркас (рисунок 4.6, б). Затем захватку заполняют бетоном с одновременным вытеснением бентонитового раствора для его регенерации и последующего повторного использования (рисунок 4.6, в). После набора захваткой необходимой прочности производится разработка и бетонирование соседней захватки (рисунок 4.6, г).



а – разработка траншеи под защитой бентонитового раствора; б – установка арматурного каркаса; в – заполнение траншеи бетоном через бетонолитные трубы; г – разработка последующих секций

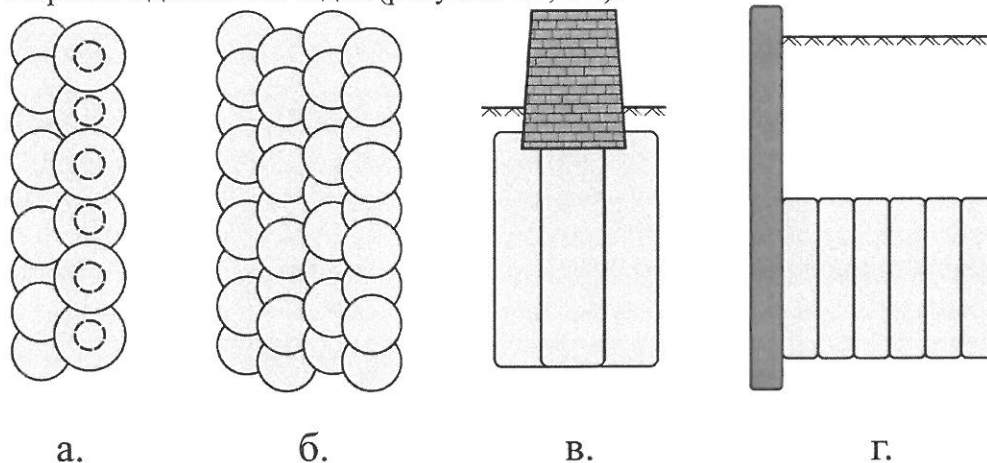
Рисунок 4.6 – Устройство «стены в грунте» траншейного типа

Свайные «стены в грунте» из БКС и БСС изготавливают в два этапа. Невозможность последовательного изготовления соседних свай без выдержки определённого срока требует шахматного порядка их изготовления. При использовании БКС взаимное расположение свай выбирается таким образом, чтобы вместе они при соприкосновении формировали единую стену (рисунок 4.5, д).

Изготовление стен из БСС осуществляется в два этапа. На первом этапе изготавливают сваи из монолитного бетона, расстояние между центрами которых составляет менее их диаметра. Свойства бетонной смеси свай первой очереди подбирают таким образом, чтобы обеспечить малую скорость набора прочности, необходимой для поддержки и распределения давления грунта на «мужские» сваи. После схватывания бетона изготавливают промежуточные сваи, подрезающие сваи первой очереди (рисунок 4.5, е).

4.4 Грунтоцементные массивы

В случае расположения ГЦС с перекрытием в плане, т. е. когда расстояния между центрами (положением лидерных скважин) свай меньше расчётного диаметра сваи, образуется сплошной грунтоцементный массив. В зависимости от характера взаимного расположения ГЦС в составе закрепляемого массива грунтов они могут применяться для решения широкого диапазона задач (рисунок 4.7, а-г).



а – ограждающая конструкция или подпорная стенка; б – сплошной массив закрепленных грунтов, в – укрепление фундамента существующего сооружения, г – противофильтрационная завеса

Рисунок 4.7 – Виды взаимного расположения ГЦС в составе массива

Одной из проблем оценки качества результата устройства грунтоцементного массива является определение степени его однородности по показателю предела прочности материала. Прямые и наиболее распространённые методы определения этих параметров основаны на разбуривании определённого процента изготовленных при создании массива свай с отбором керна.

Проблемы, характерные для такого подхода, обозначены в п. 4.2. Одной из возможных причин разброса результатов прямых определений прочности материала по керну в разных точках массива является проблема соблюдения технологии отбора и хранения керна. Вторым трудно формализуемым вопросом является количество и способ распределения контрольных скважин по площади грунтоцементного массива. Таким образом, во всех перечисленных случаях способы прямых измерений требуют больших затрат при отмеченной степени достоверности результата.

Кроме того, указанные прямые способы определения прочностных характеристик и формы свай являются «одномоментными». Полученные результаты привязаны к текущим

физико-механическим характеристикам закрепляемого массива грунтов и не могут быть повторены через некоторое время.

4.5 Заобделочное пространство тоннелей

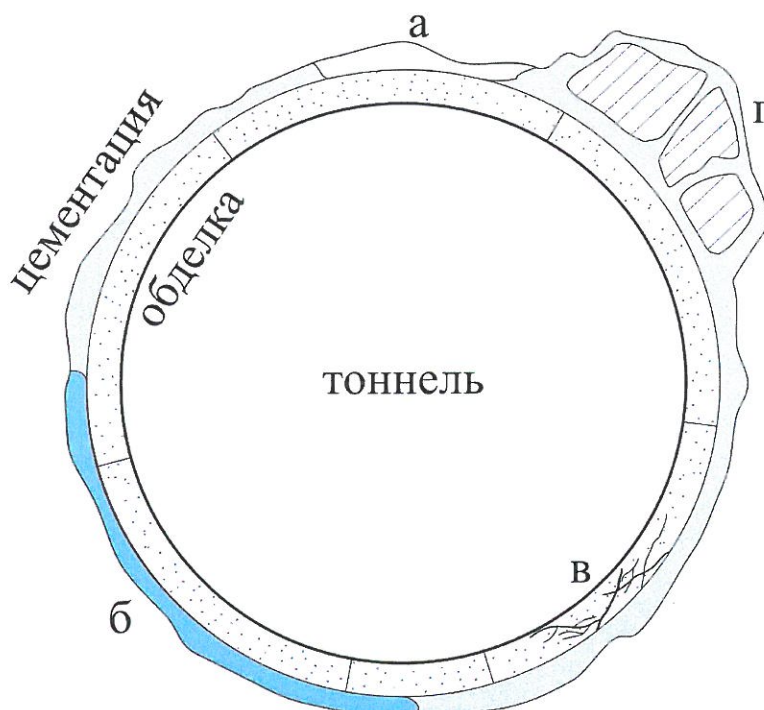
Нагнетание растворов за обделку тоннелей производится с целью заполнения остающихся за ней в процессе строительных работ пустот и зазоров твердеющими растворами, обеспечивающими совместную работу обделки с окружающим грунтом. Нагнетание растворов улучшает статическую работу, уменьшает деформации обделки, предупреждает осадки земной поверхности, обеспечивает повышение водонепроницаемости конструкций и, как следствие, уменьшает их коррозию и повышает долговечность сооружений.

Контроль качества по нагнетанию растворов за тоннельную обделку, относящихся к скрытым работам, должен проводиться систематически на всех этапах ведения работ. Согласно требованиям ГОСТ Р 57208-2016, обследование конструкций тоннелей и метрополитенов включает в себя проведение сейсмоакустического обследования заобделочного пространства тоннелей и грунтового массива.

Объектами исследования в соответствии с положениями СП 120.13330.2012, СП 122.13330.2012 являются:

- обделки железнодорожных, автодорожных тоннелей, тоннелей метрополитена (перегонных и станционных притоннельных и пристанционных сооружений, пересадочных узлов, пешеходных переходов);
- конструкции вентиляционных комплексов (шахтные стволы, нижние и верхние вентколлекторы);
- внутренние несущие конструкции станционных комплексов, притоннельных и пристанционных сооружений (колонны, пилоны, прогоны, перекрытия, стены, подплатформенные коллекторы);
- конструкции подземных и надземных вестибюлей;
- заобделочное пространство сооружений (состояние контактного слоя «грунт-обделка»);
- грунт в основании сооружений и за обделками тоннелей.

С учётом состояния грунтового массива техническое состояние сооружения оценивают в соответствии с ГОСТ 31937-2011. При обнаружении характерных трещин, деформаций конструкций, обводнённости, нарушении герметизации стыков обделки и сопряжений конструкций сооружения, свидетельствующих о неудовлетворительном состоянии заобделочного пространства или грунтового основания (рисунок 4.8), необходимо проведение инженерно-геофизического исследования, по результатам которого может потребоваться укрепление оснований или усиление грунтового массива, вмещающего тоннельное сооружение.



а – образование пустот; б – вымывание цемента и замещение его водонасыщенным грунтом; в – нарушение сплошности обделки; г – разуплотнение и разрушение примыкающего к области цементации грунтового массива

Рисунок 4.8 – Развитие негативных процессов в обделке и заобделочном пространстве

При обнаружении дефектов и повреждений, снижающих прочность, устойчивость, водонепроницаемость конструкций (обделок тоннелей, перекрытий, колонн, балок, ферм и т.п.), переходят к детальному (инструментальному) обследованию.

Детальное (инструментальное) обследование в зависимости от поставленных задач, наличия и полноты проектно-технической документации и предварительной оценки технического состояния объекта может быть сплошным и выборочным.

Сплошное обследование проводят в случае:

- отсутствия проектной документации;
- обнаружения дефектов конструкций, снижающих их несущую способность;
- возобновления строительства, прерванного на срок более трёх лет без мероприятий по консервации;
- обнаружения в однотипных конструкциях неодинаковых свойств материалов, изменения условий эксплуатации объекта под воздействием агрессивной среды, техногенных процессов и пр.

Выборочное обследование проводят:

- при необходимости обследования отдельных конструкций;
- в потенциально опасных местах, где из-за недоступности конструкций невозможно проведение сплошного обследования.

Если в процессе сплошного обследования обнаруживается, что не менее 20% однотипных конструкций при общем их числе более 20 находится в удовлетворительном состоянии, а в остальных конструкциях отсутствуют дефекты и повреждения, то допускается оставшиеся непроверенные конструкции обследовать выборочно. Объём

выборочно обследуемых конструкций следует определять конкретно (во всех случаях не менее 10% однотипных конструкций, но не менее трёх).

При обследовании состояния обделки тоннеля и заобделочного пространства применяется комплекс инструментальных неразрушающих методов, включающий сейсмоакустическую съёмку и георадарное профилирование.

4.6 Грунтовые массивы при щитовой проходке

Особенностью проходки тоннельных сооружений является их взаимодействие с окружающим грунтовым массивом, свойства которого оказывают существенное влияние на выбор трассы тоннеля, глубины заложения, конструкций и способов производства работ. Инженерно-геологические изыскания в тоннелестроении осуществляют различными методами. Основным методом изысканий является разведочное бурение.

В соответствии с требованиями ВСН-190-78 «Инструкция по инженерно-геологическим изысканиям для проектирования и строительства метрополитенов, горных железнодорожных и автодорожных тоннелей» при проведении инженерно-геологических изысканий особое внимание должно обращать на выявление:

- зон и поверхностей ослабления в массиве, в которых породы отличаются значительно более низкими прочностными свойствами в сравнении с окружающими породами (крупные тектонические нарушения, прослой пластичных глин, прослой водонасыщенных песчано-глинистых отложений и др.);
- зон с высокими фильтрационными свойствами грунтов и высоким гидростатическим напором;
- грунтов и подземных вод с высокой степенью агрессивности к материалам конструкций;
- сред взрывоопасных и оказывающих вредное влияние на здоровье людей (высокая температура, газоносность, радиоактивность и др.).

При изучении неблагоприятных для строительства зон должны быть установлены их характер, границы распространения, размеры, интенсивность развития, влияние на условия строительства и работу сооружения.

Особой детальности требует изучение инженерно-геологических условий в зоне подземного сооружения (толща грунтов на 30-40 м выше и на 8-10 м ниже лотка сооружения, а при отсутствии выше свода устойчивых грунтов – вся толща грунтов от поверхности земли до отметок на 8-10 м ниже лотка сооружения).

Геофизические исследования следует выполнять в комплексе с другими видами работ (горно-буровыми, полевыми, опытными и лабораторными) для решения следующих задач:

- установление мощности четвертичных отложений;
- выявление и оконтуривание погребённых долин размывов;
- установление мощности зон выветривания;
- выявление и оконтуривание трещиноватых зон и зон закарстованных грунтов;
- исследование условий залегания и распространения подземных вод, определение направления и скорости их движения;
- установление границ мёрзлых грунтов.

Устойчивость грунтов в выработке может ориентировочно оцениваться в соответствии с таблицей 4.1.

В соответствии с требованиями СП 47.13330.2012 вблизи источников динамических воздействий и в сейсмоопасных районах, в местах статических нагрузок под подошвой фундамента необходимо определять скорость колебаний поверхности грунта, а для мелких и пылеватых водонасыщенных песков и водонасыщенных глинистых грунтов ($S_r \geq 0,8$) в пределах зон, где скорость колебаний поверхности грунта более 15 мм/с (от импульсных источников динамических воздействий) или 2 мм/с (от прочих источников), необходимо измерять параметры динамического воздействия (частота воздействия, виброскорость, виброускорение) и проводить с учётом этих параметров определение коэффициента виброползучести инструментальным способом в соответствии с требованиями СП 22.13330.2016.

Т а б л и ц а 4.1 – Классификация степени устойчивости грунтов в выработке (f – коэффициент крепости по М.М. Протодяконову)

Степень устойчивости грунтов в выработке	Инженерно-геологические условия
Устойчивые	Грунты крепкие и очень крепкие ($f = 5 \dots 20$), нетрещиноватые или трещиноватые, но с благоприятным залеганием трещин. Трещины закрытые или цементированные вторичными материалами, без следов подвижек. В кровле выработки залегают надёжные по устойчивости грунты. Тектонические нарушения отсутствуют или проявляются очень слабо. Капёж отсутствует
Средней устойчивости	Грунты крепкие и средней крепости ($f = 2 \dots 5$), трещиноватые и сильнотрещиноватые, но с благоприятным залеганием. Тектонические нарушения выражены слабо. Консистенция глинистых грунтов твёрдая или полутвёрдая. Возможен капёж
Слабой устойчивости	Грунты слабые или средней крепости ($f = 1,0 \dots 2,0$), трещиноватые, с неблагоприятным расположением трещин и сильнотрещиноватые. Консистенция глинистых грунтов мягко- и тугопластичная. Тектонические нарушения с капезом или струйчатым водопроявлением. Быстрое отслаивание и вывалы отдельных глыб и кусков грунта
Совершенно неустойчивые	Грунты слабые или средней крепости ($f = 0,3 \dots 1,0$). Грунты текучей или мягкопластичной консистенции. Грунты сильнотрещиноватые выветрелые или раздробленные. Трещины открытые, со следами подвижек и тектонического воздействия. Чаще всего водообильные. Несвязные водоносные грунты. Без применения специальных способов проходка невозможна

Таким образом, при условии выполнения изысканий в соответствии с требованиями нормативных документов могут быть установлены границы участков, наиболее сложных для проходки, а в ряде случаев проходка таких участков без применения специальных способов невозможна. Как правило, на указанных участках остановка щита для ремонта или замены инструмента, а также нарушения регламента проходки крайне нежелательны. Это может привести к развитию деформаций в грунтовом массиве и, как следствие, к образованию провалов и просадок на дневной поверхности.

Потенциально опасными участками для образования провалов и просадок являются:

- зоны, сложенные грунтами слабой устойчивости и неустойчивыми;
- зоны развития динамически неустойчивых грунтов при наличии внешних динамических нагрузок;
- зоны с высокими фильтрационными свойствами грунтов и высоким гидростатическим напором;
- зоны вблизи подземных сооружений и коммуникаций;
- территории, где развиты карстово-суффозионные процессы.

Для детализации таких областей может применяться комплекс геофизических методов, включающий сейсморазведку, георадиолокацию, электротомографию, межскважинную акустическую томографию, измерение вибрационного поля.

5. Контроль качества одиночных буронабивных свай

5.1 Сейсмоакустический метод

5.1.1 Методика проведения работ

Сейсмоакустический метод (low strain impact testing, Sonic, SIT) контроля длины и сплошности свай основан на регистрации искусственно возбуждаемых в стволе сваи упругих волн с целью получения сведений о длине и сплошности бетона сваи. Для возбуждения упругих волн используется механический удар молотка по оголовку сваи (рисунок 5.1). Регистрация акустических волн производится с помощью датчика, установленного на оголовке сваи.

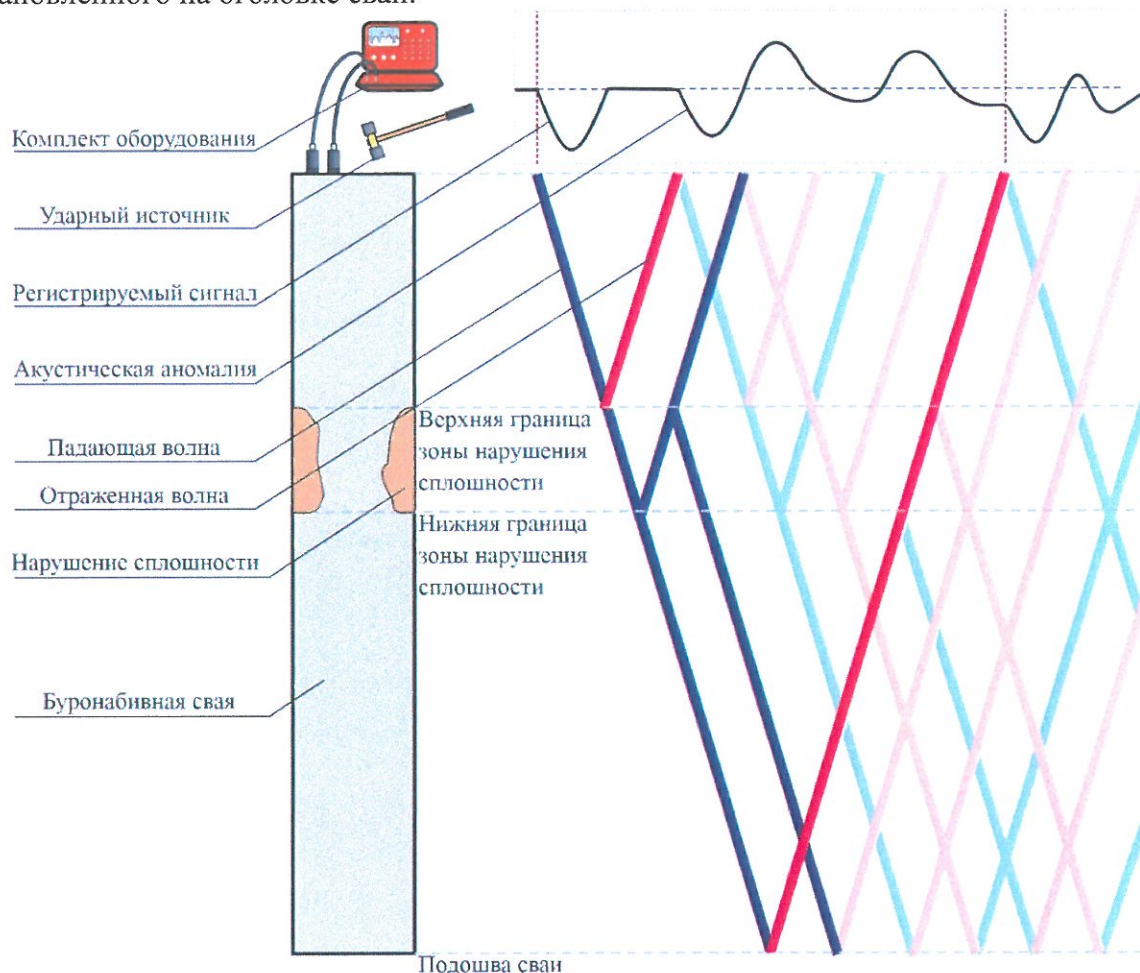


Рисунок 5.1 – Контроль свай сейсмоакустическим методом [СТО ЭГЕОС 1–1.2–001–2017]

– Точность определения длины сваи и/или расстояния до акустической аномалии зависит от выбора значения средней скорости распространения упругих волн в теле сваи и точности выделения на зарегистрированных данных отражения от нижнего конца сваи и/или акустической аномалии и оценивается величиной $\pm 10\%$.

– Длина сваи или расстояние до значительного изменения её импеданса определяется по формуле:

$$L = (v \cdot \Delta t)/2, \quad (5.1)$$

где L – длина сваи / расстояние до отражающей границы;

$v = \sqrt{E/\rho}$ – скорость стержневой волны в теле сваи (E – модуль Юнга, ρ – плотность материала сваи);

Δt – интервальное время пробега отражённой волны.

– При наблюдении на спектре зарегистрированного сигнала ярко выраженных резонансных пиков возможно определение длины сваи или расстояния до значительного изменения её импеданса по формуле

$$\Delta f = v n / (2L), \quad (5.2)$$

где Δf – расстояние между соседними резонансными пиками, Гц, $n = 1, 2, 3 \dots$

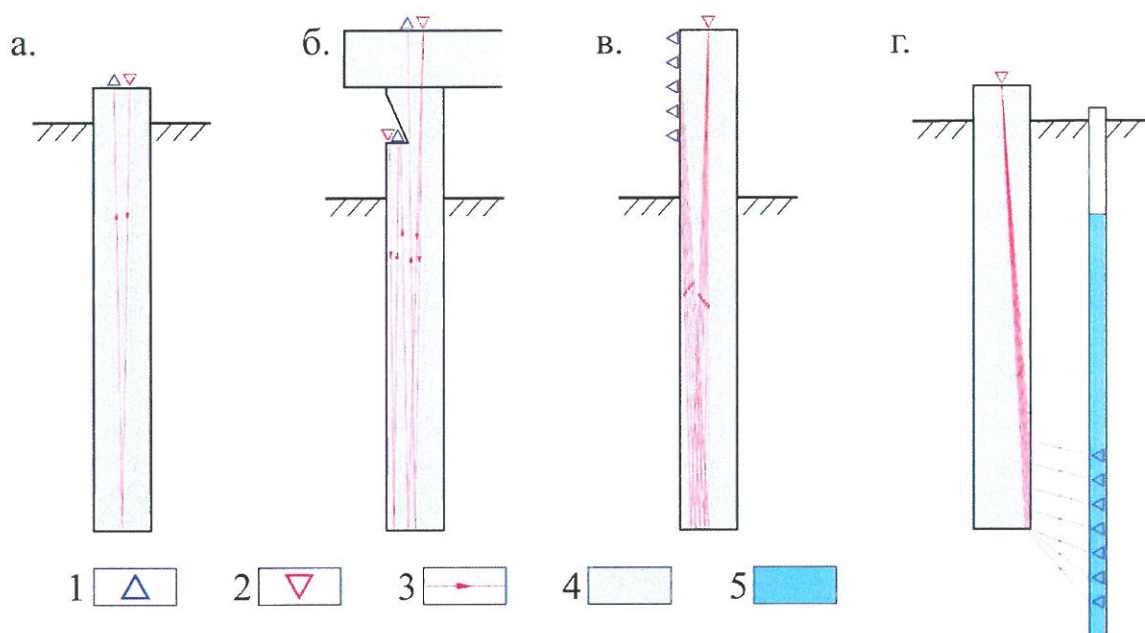
– Испытания следует проводить не ранее чем через 5 дней после окончания бетонирования сваи. В отдельных случаях, при соответствующем обосновании допускается проводить испытания в более ранние сроки, установленные программой испытаний.

– Датчик следует устанавливать на оголовок сваи на предварительно подготовленные площадки. Акустический контакт датчика с поверхностью оголовка обеспечивается с помощью нанесения специальной мастики.

– Датчик следует устанавливать на оголовок сваи таким образом, чтобы измерительная ось его была параллельна оси сваи. Для каждой точки приёма необходимо выбрать несколько точек возбуждения сигнала. Для каждой точки приёма с помощью ударного источника необходимо произвести не менее 5 ударов (накоплений сигнала) по оголовку конструкции.

– Рекомендуются использовать несколько ударных источников различного веса с различным материалом бойка. Понижение центральной частоты ударного импульса приводит к снижению разрешающей способности метода испытаний, но позволяет надёжнее выделить отражение от нижнего конца сваи. Повышение центральной частоты ударного импульса приводит к повышению разрешающей способности метода испытаний, но может значительно уменьшить отношение сигнал/шум.

– Каждый зарегистрированный сигнал должен быть снабжён данными о номере сваи, дате и времени проведения испытаний, используемом ударном источнике. В процессе проведения испытаний необходимо вести Журнал проведения испытаний, содержащий любую дополнительную информацию о свае и испытаниях.



а – стандартная; б – обследование сваи в составе ростверка; в – ультразвуковое профилирование, г – параллельный сейсмический метод. Условные обозначения: 1 – приёмник; 2 – источник; 3 – лучевые траектории распространения упругих волн; 4 – железобетон; 5 – заполненная водой скважина

Рисунок 5.2 – Методики сейсмоакустического контроля

– При обследовании свай, включённых в состав ростверка или в фундамент существующего здания, возможно использование дополняющих стандартную (рисунок 5.2, а) методику расположения источников и приёмников: на специально подготовленной площадке ниже уровня ростверка (рисунок 5.2, б); с использованием акустического профилирования вдоль боковой грани конструкции (ультрасейсмического метода / ultraseismic method, рисунок 5.2, в); с использованием параллельного сейсмического метода (parallel seismic method, рисунок 5.2, г):

– Для проведения испытания сваи с применением ультразвукового профилирования требуется доступ к участку боковой поверхности сваи протяжённостью порядка 2 м, с возможностью установки регистрирующего датчика в нескольких уровнях (желательна установка приёмника не менее чем в 5 точках, расстояние между которыми составит не менее 25-30 см). Положение источника остаётся неизменным, удар наносится по поверхности оголовка конструкции или по специально подготовленной площадке на боковой грани конструкции. Зарегистрированная сейсмограмма анализируется в отношении наличия годографов прямой и отражённой волн. По годографу прямой волны определяется скорость упругой волны в теле сваи, по годографу отражённой волны – время прихода отражения от нижнего конца сваи или значительного изменения импеданса.

– Для определения длины сваи параллельным сейсмическим методом вблизи от обследуемой конструкции бурят скважину, глубина которой превышает предполагаемую глубину заложения фундамента. Возбуждение сигнала производится с поверхности исследуемой конструкции с помощью ударного источника. Приёмник колебаний перемещается с фиксированным шагом вдоль скважины; для каждого положения приёмника производится регистрации серии ударов (накоплений). Рекомендуемый шаг между соседними положениями приёмника – 10-20 см. На сейсмограммах выделяется годограф прямой волны, распространяющейся через исследуемую конструкцию и вмещающие грунты, на котором по точке излома/резкого снижения кажущейся скорости

отмечается подошва сооружения. Точность определения глубины заложения фундамента параллельным методом оценивается величиной $\pm 5\%$.

5.1.2 Подготовка к проведению испытаний

– Для уточнения методики проведения испытаний, разработки программы испытаний, интерпретации результатов и составления технического отчёта следует использовать проектную и исполнительную документацию.

– Для проведения испытаний согласно выбранной методике должен быть обеспечен доступ к площадке для установки датчика на поверхность сваи.

– Перед проведением испытаний следует выполнить визуальный осмотр оголовка сваи. Рекомендуются измерить фактические размеры оголовка сваи; определить наличие и расположение арматурных выпусков, состояние поверхности бетона оголовка, однородность структуры бетона; наличие бетонной подготовки, толщину подготовки и её взаимодействие со свайей.

– Не допускается проводить испытания буронабивных свай при наличии в верхней части сваи шламового слоя. При выявлении трещин или шламового слоя в оголовке свая должна быть срублена до бетона с ненарушенной сплошностью.

– Наличие массивных арматурных выпусков может усложнить интерпретацию зарегистрированных данных. При возможности рекомендуется удаление арматурных выпусков перед проведением испытаний.

– Для свай диаметром более 500 мм датчик следует устанавливать не менее, чем на трёх площадках (точках приёма), распределённых по площади оголовка.

– Площадки на оголовке сваи, выбранные для установки датчика, должны быть с помощью угловой шлифовальной машины выровнены перпендикулярно оси сваи.

– Перед установкой датчика площадки, подготовленные для установки датчика, необходимо очистить от грунта, пыли, жидкости, льда и других посторонних материалов.

5.1.3 Аппаратура

– Комплект оборудования для проведения контроля сплошности свай сейсмоакустическим методом должен включать набор ударных источников, электронный блок и датчик, измеряющий ускорение или скорость смещения частиц оголовка сваи.

– Возбуждение акустической волны следует производить с помощью ударного источника (молотка). Удар молотка по оголовку сваи не должен приводить к локальному разрушению оголовка сваи. Молоток может быть оснащён датчиком, измеряющим силу удара в зависимости от времени.

– Рекомендуется применять несколько ударных источников различного веса, с различным материалом бойка. Подбор ударных источников по весу и материалу бойка следует производить исходя из имеющихся сведений о геометрических параметрах исследуемой сваи и инженерно-геологических условиях рабочей площадки.

– Регистрацию акустических волн следует производить с помощью датчика, измеряющего ускорение или скорость смещения частиц оголовка сваи (акселерометра или велосиметра).

– Сигналы, зарегистрированные датчиком, передаются на электронный блок. В состав электронного блока должны входить цифровой компьютер или микропроцессорное устройство, графический дисплей для визуализации зарегистрированных сигналов, устройство для хранения результатов измерений. Оборудование должно позволять передавать зарегистрированные данные на устройство постоянного хранения информации.

– Разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП) оборудования для регистрации данных должна быть не менее 12 бит. Частота дискретизации АЦП должна быть не менее 25 000 Гц.

– Оборудование должно выполнять визуализацию зарегистрированных сигналов сразу после регистрации для возможности визуального контроля качества зарегистрированных данных непосредственно в процессе проведения испытаний.

5.1.4 Обработка данных

– Целями обработки зарегистрированных данных являются увеличение отношения сигнал/помеха и подготовка зарегистрированных данных к интерпретации.

Граф обработки зарегистрированных сигналов следующий.

– Сбор данных в один массив – для каждой испытанной сваи, для каждого использованного ударного источника производится сбор всех зарегистрированных сигналов в один массив данных для совместной визуализации, анализа характерных особенностей зарегистрированных сигналов, контроля качества зарегистрированных данных и удаления сигналов неудовлетворительного качества. При необходимости вводят статические поправки для приведения начала регистрации к одной временной отметке.

– Амплитудная коррекция (усиление) – компенсация (обычно, экспоненциальная) ослабления сигнала, связанного с потерей части энергии возбуждённого импульса.

– Фильтрация – задача фильтрации сигнала состоит в отделении полезного сигнала от помех и в увеличении отношения сигнал/помеха.

– Осреднение накопленных сигналов – для каждой испытанной сваи, для каждого использованного ударного источника рекомендуется выполнять осреднение серии сигналов для удобства визуализации, подавления случайных помех и повышения надёжности обработки.

– Расчёт длины сваи и расстояния до акустических аномалий выполняется по формуле (5.1). Для перевода значений времени в значения глубины необходимо задать скорость распространения упругих волн в теле сваи. При работе с данными в частотной области используется формула (5.2).

– Для обработки и визуализации зарегистрированных сигналов могут быть также применены дополнительные процедуры: сглаживание, нормализация, инструменты для спектрального анализа и др.

– Для определения длины свай и/или расстояния до акустической аномалии необходимо задать скорость распространения упругих волн в свае. Скорость распространения упругих волн в свае предполагается постоянной и принимается по данным градуировочных зависимостей с учётом априорной информации или по измерениям на сваях с известной длиной. Рекомендованные значения скорости распространения волн в бетоне составляют 3500-4400 м/с.

– При обработке данных рекомендуется выделять сваи, значения усиления, фильтрации и скорости распространения упругих волн в которых значительно отличаются от средних значений параметров обработки, установленных для других свай на объекте испытаний.

5.1.5 Интерпретация данных

– Интерпретация данных сейсмоакустического метода заключается в определении длины и формулировании выводов о сплошности испытуемой сваи на основании комплексного анализа результатов обработки зарегистрированных сигналов и дополнительной априорной информации.

– Для определения длины и сплошности сваи необходимо выделить (если это возможно) на полученных в результате обработки сигналах отражения от нижнего конца сваи и нарушений сплошности бетона сваи (при наличии).

– Интерпретацию данных следует выполнять в соответствии с следующими рекомендациями:

– Полученные в результате обработки сигналы рекомендуется сопоставить с набором типовых сейсмоакустических сигналов для выделения характерных особенностей зарегистрированных данных (рисунок 5.3). Сходство зарегистрированных данных с типовыми сигналами не должно использоваться в качестве единственного довода для вынесения заключения о состоянии сваи.

– Интерпретацию рекомендуется проводить с привлечением сигналов, собранных с применением различных ударных источников.

– Изменения в характеристиках вмещающих грунтов могут проявляться на зарегистрированных сигналах в виде акустических аномалий. Глубину выделенных на сигналах акустических аномалий необходимо сопоставить с положением известных границ инженерно-геологических элементов (ИГЭ).











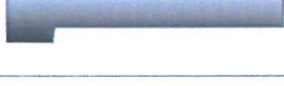
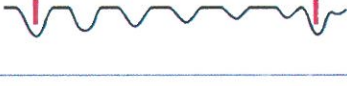


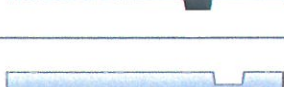


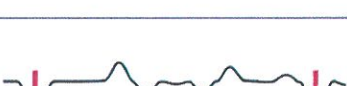






Профиль сваи	Описание	Регистрируемый сигнал
	Свая проектной длины, с постоянным сечением	
	Свая проектной длины, с постоянным сечением, опирающаяся на грунты повышенной акустической жесткости	
	Свая с постоянным сечением, длина которой не соответствует проекту	
	Свая проектной длины, с увеличением акустического импеданса в нижней части	
	Свая проектной длины, со снижением акустического импеданса в нижней части	
	Свая проектной длины, со снижением акустического импеданса в верхней части	
	Свая проектной длины, с увеличением акустического импеданса в верхней части	
	Свая проектной длины, с локальным увеличением акустического импеданса	
	Свая проектной длины, с локальным снижением акустического импеданса	
	Свая проектной длины, с локальным увеличением акустического импеданса в верхней части	
	Свая проектной длины, с локальным снижением акустического импеданса в верхней части	
	Свая проектной длины, с нерегулярным профилем	

Рисунок 5.3 – Типовые сейсмоакустические сигналы, полученные в результате численного моделирования. Красными маркерами выделены проектные отметки верхнего и нижнего конца сваи [Мухин и др., 2019]

5.2 Ультразвуковой метод

5.2.1 Методика проведения работ

– Контроль сплошности бетона свай ультразвуковым методом основан на анализе параметров ультразвуковых волн (скорость распространения и затухание) с целью получения выводов о сплошности бетона конструкции.

– Для проведения измерений в одну трубу доступа до нижней отметки погружают источник, а в другую – приёмник ультразвуковых волн. Источник и приёмник синхронно поднимают и с заданным шагом производят возбуждение и регистрацию ультразвуковых сигналов (рисунок 5.4). Упругие волны, возбуждённые с помощью источника, распространяются в бетоне сваи и регистрируются с помощью приёмника. Зарегистрированные сигналы (зависимость амплитуды ультразвукового сигнала от времени) передают на персональный компьютер для дальнейшей визуализации, обработки и интерпретации.

– Наличие в свае включений инородного материала (грунт, шламовый материал, вода, бентонит, пустоты) или бетона с нарушенным составом приводит к локальному снижению скорости распространения ультразвуковых волн и к повышению значений затухания зарегистрированного сигнала.

– Метод испытаний позволяет обнаружить области нарушения сплошности бетона, расположенные в пределах плоскостей между осями труб доступа, локализовать их по глубине и выполнять оценку их расположения в пределах сечения сваи.

– Скорость распространения ультразвукового сигнала (V) рассчитывается по формуле

$$V = L/t, \quad (5.3)$$

где L – база измерений;

t – время первого вступления ультразвукового сигнала.

– Скорость распространения ультразвуковых волн в бетоне хорошего качества обычно составляет 3600-4400 м/с в зависимости от класса и возраста бетона.

Оценка затухания сигнала осуществляется по формуле

$$\gamma = -20 \cdot \lg E/E_0, \quad (5.4)$$

где E – энергия сигнала (рассчитывается суммированием абсолютных значений амплитуды сигнала в пределах заданного временного окна);

E_0 – максимальное значение энергии сигналов, зарегистрированных на профиле измерений.

– Испытания следует проводить не ранее чем через 5 дней после окончания бетонирования сваи. В отдельных случаях допускается проводить испытания в сроки, установленные Программой испытаний.

– Перед проведением испытаний необходимо измерить расстояние между всеми трубами доступа и превышение труб доступа относительно верха бетона сваи.

– Источник и приёмник необходимо погрузить до нижнего конца труб доступа. Если нижние отметки труб доступа не совпадают, преобразователь, погруженный ниже, следует поднять до уровня второго преобразователя.

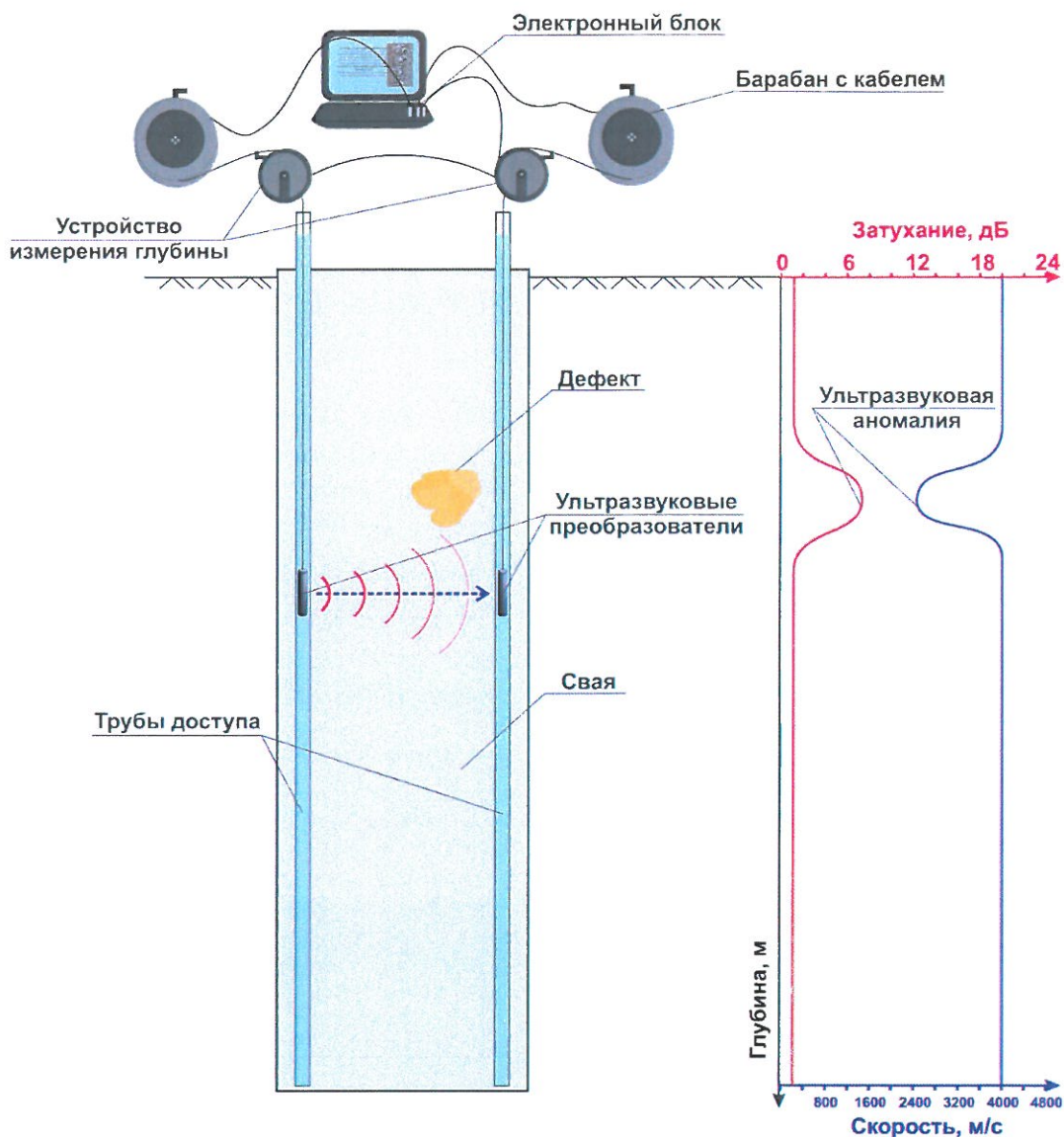


Рисунок 5.4 – Схема проведения испытаний свай ультразвуковым методом [Мухин и др., 2019]

- Источник и приёмник следует поднимать синхронно и с заданным шагом производить возбуждение и регистрацию ультразвуковых сигналов. Ультразвуковые преобразователи должны подниматься со скоростью, не превышающей рекомендации производителя оборудования. Аналоговые сигналы, зарегистрированные приёмником, преобразуются в цифровой сигнал и сохраняются в памяти прибора.
- Шаг записи (регистрации) ультразвуковых сигналов не должен превышать 250 мм. Рекомендованное значение шага записи – 50 мм.
- Измерения необходимо выполнить от нижней отметки труб доступа до верхней отметки бетона конструкции для каждой пары труб доступа, установленных в конструкцию.
- В процессе проведения измерений уровень воды в трубах доступа не должен опускаться ниже верха бетона сваи.
- Если на профиле измерений была зарегистрирована ультразвуковая аномалия, требуется проведение повторных измерений в диапазоне глубин, включающем аномалию, с шагом записи не более 50 мм.

– В случае обнаружения ультразвуковых аномалий рекомендуется проведение дополнительных измерений по методике межскважинной ультразвуковой томографии с целью уточнения положения, геометрических размеров и свойств аномальной зоны.

– Если длина профиля измерений отличается от определённой с помощью измерительной ленты с грузом длины труб доступа более чем на 1% от длины труб доступа или более чем на 0,25 м, следует провести повторные измерения и проверить работоспособность комплекта оборудования. Если длины труб доступа различаются, следует использовать при сравнении длину более короткой трубы. При сравнении длин следует учитывать, что точка записи приёмника не совпадает с его нижним концом.

– После проведения измерений необходимо выполнить визуальный анализ качества зарегистрированных данных. В случае низкого качества зарегистрированных данных (высокого уровня помех) следует проверить работоспособность оборудования и выполнить повторные измерения.

– Если по результатам выполненных измерений требуется дать оценку прочности бетона сваи по методике, представленной в ГОСТ 17624-2012, обязательны следующие дополнения к стандартной методике проведения испытаний.

– В рассчитываемую скорость ультразвукового сигнала вносится поправка за пробег волны внутри труб доступа по формуле

$$V = L / (t - 2(\frac{L_{\text{тр}}}{V_{\text{тр}}} + \frac{L_{\text{в}}}{V_{\text{в}}}), \quad (5.5)$$

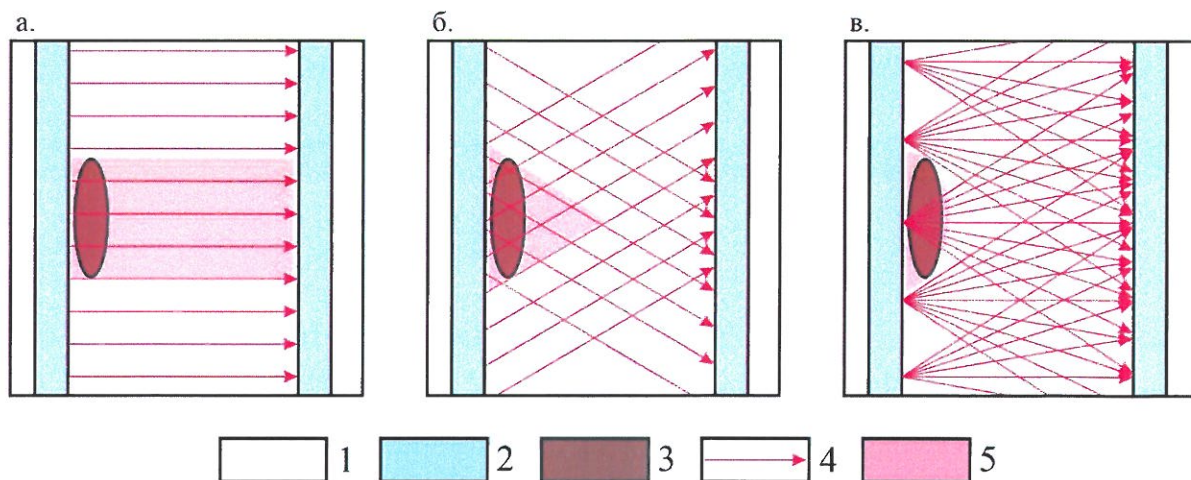
где $L_{\text{тр}}$ – толщина стенки трубы доступа;

$L_{\text{в}}$ – пробег волны в воде / расстояние между трубой доступа и датчиком;

$V_{\text{тр}}$ – скорость волны в материале трубы доступа (5100 м/с для стальных труб доступа или 2300 м/с для полимерных труб доступа);

$V_{\text{в}}$ – скорость волны в воде (может быть принята равной 1500 м/с).

– При обнаружении на профиле зон с аномальным снижением скорости и роста затухания необходимо выполнить дополнительные измерения по методике косых прозвучиваний (рисунок 5.5, б) или по методике томографической съёмки (рисунок 5.5, в) для локализации аномальной зоны в пределах изучаемого сечения сваи.



а – параллельных прозвучиваний; б – дополнительной съёмки по методике косых прозвучиваний; в – томографической съёмки. Условные обозначения: 1 – бетон сваи; 2 – заполненные водой трубы доступа; 3 – дефект материала; 4 – лучевые траектории пробега волн; 5 – реконструируемый по результатам съёмки размер дефекта

Рисунок 5.5 – Локализация аномальной зоны при использовании

– В процессе проведения испытаний необходимо вести Журнал проведения испытаний. Этот журнал должен содержать название объекта; идентификатор (номер) испытываемой сваи; сведения о применяемой аппаратуре; дату и время проведения испытаний; схему взаимного расположения, идентификаторы, длины, материал и внутренний диаметр труб доступа; базу измерений; превышение труб доступа относительно верха бетона сваи.

– Каждый зарегистрированный ультразвуковой сигнал должен быть снабжён данными о глубине погружения ультразвуковых преобразователей, базе измерений, а также идентификатором испытываемой сваи, пары труб доступа; отметками даты и времени.

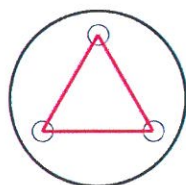
5.2.2 Подготовка к проведению испытаний

– Для уточнения методики проведения испытаний, разработки Программы испытаний, последующей интерпретации результатов и составления Технического отчёта следует использовать проектную и исполнительную документацию.

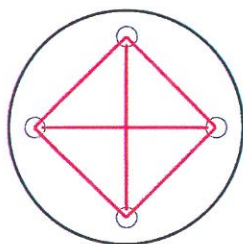
– Для проведения испытаний в процессе изготовления сваи в тело сваи в составе арматурного каркаса должны быть установлены стальные или полимерные трубы доступа. Внутренний диаметр труб доступа должен позволять ультразвуковым преобразователям свободно перемещаться по трубам доступа. Рекомендованное значение внутреннего диаметра труб доступа – 40-55 мм.

– Для проведения испытаний ультразвуковым методом рекомендуется установка стальных труб доступа. Полимерные трубы рекомендуется заполнять водой до или сразу после бетонирования конструкции с целью предотвращения нарушения контакта между трубами доступа и бетоном конструкции. Испытания в полимерных трубах должны проводиться в минимальные допустимые сроки после набора материалом конструкции необходимой прочности.

– В испытываемую сваю рекомендуется устанавливать по одной трубе доступа на каждые 250-300 мм диаметра сваи, но не менее 3 шт. (рисунок 5.6). Трубы доступа должны быть равномерно распределены по всему периметру сваи и разнесены на одинаковое расстояние от её центральной оси.



Свая $\varnothing < 1000$ мм



Свая $\varnothing 1000-1400$ мм

Условные обозначения:



Профиль измерений

Рисунок 5.6 – Рекомендованная схема расположения труб доступа и профилей измерений

– Трубы должны быть ровные, недеформированные и достаточно прочные, чтобы сохранять свою форму при перевозке, монтаже и бетонировании сваи. Трубы доступа должны иметь постоянный внутренний диаметр, без препятствий для перемещения ультразвуковых преобразователей, включая места стыковки отдельных секций труб доступа. Если требуется стыковка отдельных секций труб доступа, должна быть обеспечена герметичность стыков.

– Во избежание попадания в полость труб доступа бурового раствора, цементного молока, грунтового материала и пр. на верхнем и нижнем концах труб должны быть установлены герметичные заглушки.

– Трубы доступа должны быть надёжно прикреплены к арматурному каркасу и быть ему соосны. Нижний конец труб доступа должен находиться на минимальном расстоянии от нижнего конца сваи. Верхний конец труб доступа должен находиться выше уровня земли и уровня верха бетона сваи не менее чем на 300 мм. Трубы доступа не должны быть повреждены в процессе монтажа арматурного каркаса и бетонирования сваи и должны сохранять своё проектное положение.

– Перед проведением испытаний должен быть обеспечен доступ к верхним концам труб доступа. Заглушки с верхних концов труб доступа должны быть удалены.

– Перед проведением испытаний следует выполнять проверку проходимости труб доступа и измерение их длины с точностью до 50 мм с помощью измерительной ленты с грузом (пробником). Диаметр груза должен быть не менее диаметра ультразвукового преобразователя. Если труба доступа заблокирована, глубина, на которой было обнаружено препятствие, регистрируется в Журнале проведения испытаний.

– Перед проведением испытаний трубы доступа должны быть заполнены водой. При проведении испытаний в условиях отрицательной температуры воздуха возможно заполнение верхней части труб доступа незамерзающей жидкостью.

5.2.3 Аппаратура

– Комплект оборудования для проведения контроля сплошности свай ультразвуковым методом должен включать ультразвуковые преобразователи (приёмник, не менее 1 шт., и источник, не менее 1 шт.), электронный блок, устройство измерения глубины погружения ультразвуковых преобразователей (энкодер), набор кабелей для погружения преобразователей и передачи данных.

– Центральная частота возбуждаемых источником ультразвуковых колебаний должна составлять от 30 000 до 80 000 Гц.

– Возбуждение и регистрация ультразвуковых сигналов должны выполняться через установленный интервал глубины или времени.

– Электронный блок выполняет регистрацию, хранение, визуализацию и предварительную обработку ультразвуковых сигналов. Разрядность АЦП оборудования для регистрации данных должна быть не менее 12 бит. Электронный блок должен позволять передавать зарегистрированные данные на устройство постоянного хранения информации.

– Для визуализации данных должен использоваться персональный компьютер или микропроцессор для вывода результатов измерений на графический дисплей.

– Корпус ультразвуковых преобразователей должен сохранять водонепроницаемость на глубине погружения, не менее чем в 1,5 раза превышающей максимально возможную глубину измерений (длину кабелей для погружения преобразователей).

– Если внутренний диаметр трубы доступа превышает диаметр ультразвукового преобразователя более чем в два раза, ультразвуковой преобразователь должен быть оснащён центраторами.

– Глубина погружения ультразвуковых преобразователей в трубы доступа в процессе проведения испытаний должна регистрироваться устройством измерения глубины (энкодером). Точность измерения глубины должна составлять не менее 1% от длины труб доступа и не менее 0,1 м. Глубина погружения ультразвуковых преобразователей в трубы доступа может регистрироваться путём пропускания кабелей для погружения преобразователей через шкив, снабжённый устройством измерения глубины. Проскальзывание кабеля через шкив не допускается.

5.2.4 Обработка данных

– Для каждого из зарегистрированных ультразвуковых сигналов необходимо выполнить определение параметров ультразвуковых волн: время первого вступления, скорость распространения ультразвуковых волн и затухание ультразвукового сигнала.

– После расчёта значений скорости распространения ультразвуковых волн для каждого профиля измерений желательнее всего выполнить расчёт значения средней скорости и расчёт отклонений всех значений скорости на профиле измерений от значения средней скорости. Отклонения от значения средней скорости выражаются в процентах.

– Определение времени первого вступления должно производиться автоматически, с использованием одного из специальных алгоритмов. После автоматической установки меток первого вступления необходимо выполнить проверку и, при необходимости, ручную корректировку результатов работы алгоритма.

– По полученным значениям времени первого вступления необходимо выполнить расчёт скорости распространения ультразвукового сигнала по формуле (5.3). При расчёте скорости рекомендуется учитывать время распространения ультразвукового сигнала в трубе доступа согласно формуле (5.5).

– Для каждого из зарегистрированных ультразвуковых сигналов необходимо выполнить расчёт энергии и затухания ультразвукового сигнала согласно формуле (5.4).

– Результаты измерений следует представлять в виде графиков зависимости скорости распространения и затухания ультразвукового сигнала от глубины и в виде сейсмограмм. Анализ сейсмограммы позволяет оперативно выделить изменения амплитуды и времени первого вступления зарегистрированных сигналов и оценить качество зарегистрированных данных.

5.2.5 Интерпретация данных

– Интерпретация данных ультразвукового метода заключается в подготовке выводов о сплошности бетона сваи на основании комплексного анализа результатов испытаний и дополнительной априорной информации.

– Для определения сплошности сваи на каждом профиле измерений производится выделение и анализ локальных отклонений скорости распространения и затухания ультразвуковых волн от нормы.

– Рекомендованные критерии выделения ультразвуковых аномалий по отклонению значений скорости распространения ультразвуковых волн от средней скорости и по значениям затухания ультразвуковых волн приведены на рисунок 5.7.

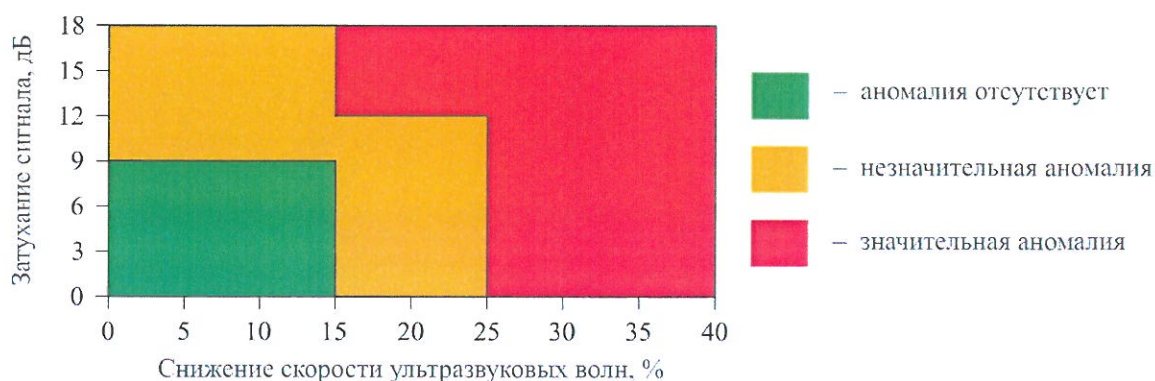


Рисунок 5.7 – Критерии выделения ультразвуковых аномалий [Мухин и др., 2019]

– Значительная ультразвуковая аномалия может интерпретироваться в качестве нарушения сплошности бетона конструкции. Незначительная ультразвуковая аномалия может интерпретироваться в качестве нарушения сплошности бетона конструкции в случае, если аномальное изменение параметров ультразвукового сигнала на данном участке глубин зарегистрировано более чем на одном профиле измерений.

– При интерпретации данных рекомендуется учитывать справочные сведения о средних скоростях распространения ультразвуковых волн в бетоне в зависимости от класса и возраста бетона.

– Причины регистрации ультразвуковых аномалий, не связанных с нарушением сплошности бетона конструкции, представлены в таблице 5.1.

Т а б л и ц а 5.1– Ультразвуковые аномалии, не связанные с нарушением сплошности бетона [Мухин и др., 2019]

Причина регистрации ультразвуковой аномалии	Изменение параметров ультразвукового сигнала	Методика интерпретации; дополнительные исследования
Трубы доступа не параллельны друг другу	Плавное изменение скорости распространения ультразвуковых волн; увеличение затухания не наблюдается	Сравнение значений скорости, зарегистрированных на всех профилях измерений
Ошибка в определении глубины погружения ультразвуковых преобразователей (проскальзывание кабелей, некорректная работа энкодеров)	Снижение скорости распространения ультразвуковых волн; увеличение затухания не наблюдается	Проведение повторных измерений, контроль работоспособности оборудования
Нарушение контакта между полимерными трубами доступа и бетоном конструкции	Значительное увеличение затухания ультразвукового сигнала	Проведение дополнительных измерений по методике межскважинной ультразвуковой томографии
Неравномерная скорость набора прочности бетона, вызванная применением бетонных смесей разного состава в пределах одной конструкции и др. причинами	Изменение скорости распространения ультразвуковых волн; увеличение затухания	Проведение повторных измерений через несколько дней
Отсутствие воды в верхней части труб доступа	Значительное затухание ультразвукового сигнала	Проведение повторных измерений после заполнения труб доступа водой

5.3 Термометрический метод

5.3.1 Методика проведения работ

– Неразрушающий контроль качества свай термометрическим методом основан на измерении температуры в свае в процессе твердения бетона с целью получения сведений о сплошности бетона сваи.

– Измерения температуры проводятся через установленные в составе арматурного каркаса сваи трубы доступа с помощью термометрического зонда (рисунок 5.8). Зарегистрированные температурные профили передаются на персональный компьютер для дальнейшей визуализации, обработки и интерпретации.

– Сроки проведения испытаний термометрическим методом определяются интервалом времени, в течение которого температура в свае близка к максимальному значению. Время достижения максимальной температуры в свае зависит от диаметра сваи и от состава бетонной смеси. Срок проведения испытаний назначают не ранее 8 и не позднее 48 часов после окончания бетонирования сваи. Если используются добавки, замедляющие или ускоряющие сроки схватывания и твердения бетона, это необходимо учитывать при планировании сроков проведения испытаний.

– Для определения оптимального времени проведения контроля сплошности свай термометрическим методом рекомендуется проведение мониторинга температуры через интервал времени, установленный программой испытаний. Полученные в результате мониторинга сведения следует использовать для планирования испытаний свай со сходными геометрическими размерами и свойствами бетонной смеси.

– Регистрацию значений температуры следует выполнять в процессе опускания термометрического зонда от верхнего до нижнего конца трубы доступа. Термометрический зонд опускают с постоянной скоростью, не превышающей рекомендации производителя оборудования (обычно не более 150 мм/с). Измерения выполняют во всех трубах доступа, установленных в испытываемой свае.

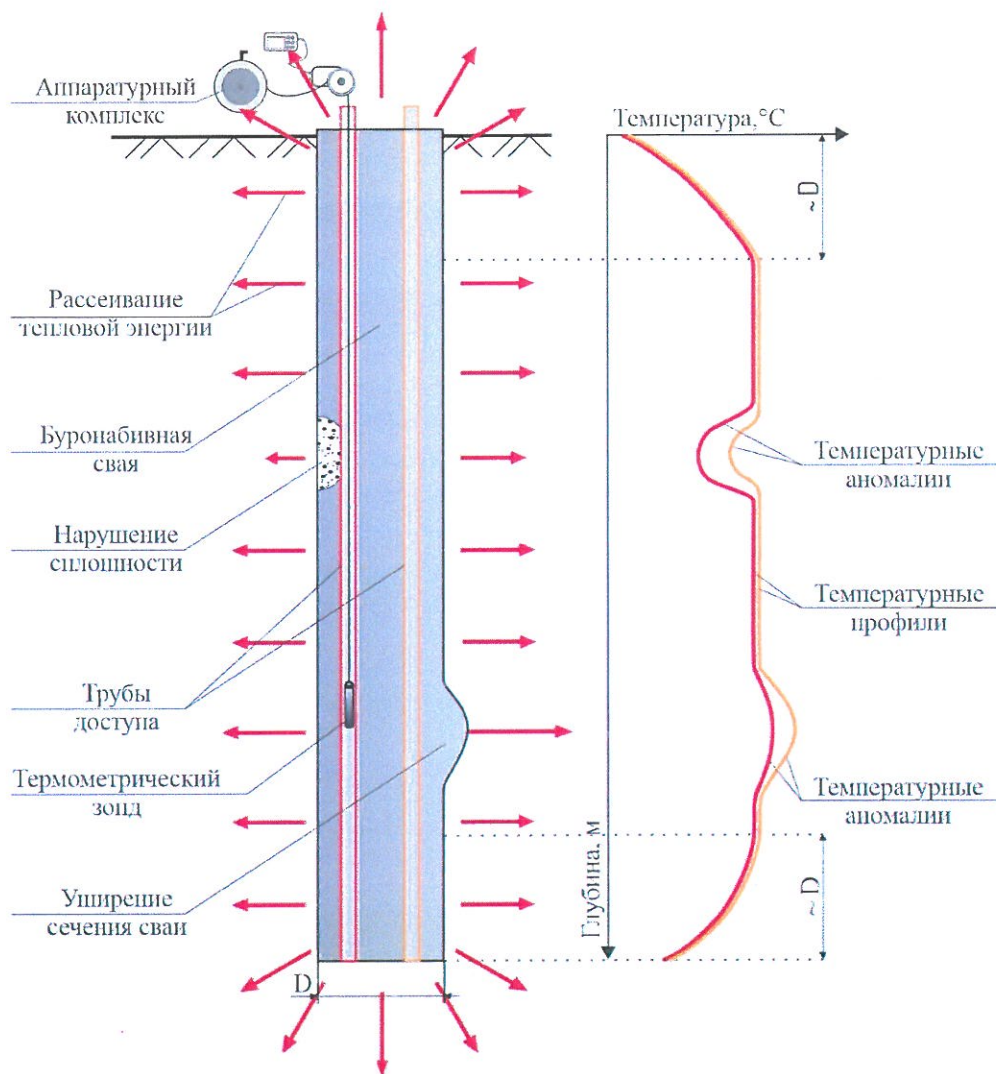


Рисунок 5.8 – Схема проведения контроля сплошности бетона свай термометрическим методом [Мухин и др., 2019]

- Шаг записи (регистрации) значений температуры не должен превышать 100 мм. Рекомендованное значение шага записи – 50 мм.
- Каждое зарегистрированное значение температуры должно быть привязано: к глубине опускания термометрического зонда; к объекту; к испытываемой свае; к трубе доступа; к дате и времени.
- Если длина температурного профиля отличается от измеренной с помощью измерительной ленты с грузом длины труб доступа более чем на 1% от длины труб доступа или более чем на 0,15 м, следует провести повторные измерения и проверить работоспособность комплекта оборудования. При сравнении длин следует учитывать, что точка записи термометрического зонда не совпадает с его нижним концом.
- На объекте испытаний рекомендуется выполнять выборочные контрольные (повторные) измерения сразу после проведения рядовых измерений. Расхождение значений температурных профилей не должно превышать 2 °С.
- В процессе проведения испытаний необходимо вести Журнал проведения испытаний. Журнал проведения испытаний должен содержать название объекта; название фундамента; номер испытываемой сваи; сведения о применяемой аппаратуре; дату и время проведения испытаний; схему взаимного расположения, номер, длину, материал,

внутренний диаметр и отметку верха труб доступа; примечания, содержащие любую дополнительную информацию о свае и испытаниях.

5.3.2 Подготовка к проведению испытаний

– Для уточнения методики проведения испытаний, разработки Программы испытаний, последующей интерпретации результатов и составления Технического отчёта следует использовать проектную и исполнительную документацию.

– Для проведения испытаний в процессе изготовления сваи в тело сваи в составе арматурного каркаса должны быть установлены стальные или полимерные трубы доступа. Рекомендации к установке труб доступа соответствуют п. 5.2.2 настоящего Руководства.

– Присутствие жидкостей (воды, бентонита и др.) перед и в процессе проведения испытаний в трубах доступа не допускается. Во избежание попадания в полость труб доступа бурового раствора, цементного молока, грунтового материала и пр. на верхнем и нижнем концах труб должны быть установлены герметичные заглушки.

– Для свай диаметром менее 600 мм допускается установка одной трубы доступа по центру конструкции.

5.3.3 Аппаратура

– Комплект оборудования для проведения контроля сплошности свай термометрическим методом должен состоять из термометрического зонда, устройства измерения перемещения зонда, электронного блока, кабелей для опускания зонда и коммутации оборудования. Электронный блок должен позволять передавать зарегистрированные данные на устройство постоянного хранения информации.

– Термометрический зонд должен быть оснащён бесконтактными инфракрасными температурными датчиками (не менее 4 шт.), расположенными в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через ось зонда.

– Погрешность измерения температуры должна составлять не более 1 °С.

– Глубина опускания термометрического зонда в трубу доступа должна регистрироваться устройством измерения перемещения. Пределы допустимой абсолютной погрешности измерения перемещения должны составлять не более 1% от длины труб доступа и не более 0,1 м. Глубина опускания зонда в трубу доступа может регистрироваться путём пропускания кабеля для погружения зонда через ведущий блок, который связан с угловым датчиком перемещения. Проскальзывание кабеля через блок не допускается.

– Электронный блок должен записывать в память прибора значения температуры и соответствующие им значения глубины опускания термометрического зонда в трубу доступа. Дискретность индикации температуры должна составлять не более 0,1 °С. Дискретность индикации глубины должна составлять не более 0,05 м.

– Для визуализации данных должен использоваться персональный компьютер или микропроцессор, способный выводить результаты измерений на графический дисплей.

5.3.4 Обработка данных

– Перед представлением зарегистрированных данных необходимо вычислить значение температуры в каждой точке измерения. За значение температуры в точке измерения принимается среднеарифметическое показаний температурных датчиков.

– Представление зарегистрированных данных для каждой сваи выполняются в виде температурных профилей (графиков изменения значений температуры в свае в зависимости от глубины) для каждой трубы доступа.

– Для каждой сваи следует выполнить расчёт среднего температурного профиля. За значение температуры среднего температурного профиля сваи на каждой отметке погружения термометрического зонда принимается среднеарифметическое значение для профилей, зарегистрированных во всех трубах доступа.

– В верхней и нижней частях сваи на участках длиной около одного диаметра сваи вводят поправку за снижение значений температуры, связанное с рассеиванием тепла не только в радиальном, но и в продольном направлении. Измеренная кривая $T_{measured}(z)$ аппроксимируется функцией $T_{fit}(z)$:

$$T_{fit}(z) = -\left(\frac{T_{max} - T_{min}}{2}\right) \operatorname{th}\left(\frac{z - z_0}{\alpha}\right) + \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2}\right), \quad (5.6)$$

где для *верхней части температурного профиля*:

T_{max} – среднее значение температуры на ближайшем к области ввода поправок участке температурного профиля, на котором значения температуры изменяются незначительно, °С;

T_{min} – значение температуры, выбираемое таким образом, чтобы точка перегиба функции $T_{fit}(z)$ была близка к температуре воздуха на момент измерений, °С;

z_0 – отметка верха бетона сваи, м;

α – «временной» параметр, м;

для *нижней части температурного профиля*:

T_{max} – среднее значение температуры на ближайшем к области ввода поправок участке температурного профиля, на котором значения температуры изменяются незначительно, °С;

T_{min} – температура вмещающих грунтов (по справочным данным), °С;

z_0 – отметка нижнего конца сваи, м.

– Поправка в зарегистрированные в верхней и нижней частях сваи значения температуры вводится по формуле

$$T_{cor}(z) = \left(\frac{T_{measured}(z) - T_{min}}{T_{fit}(z) - T_{min}}\right) (T_{max} - T_{min}) + T_{min}, \quad (5.7)$$

где T_{cor} – значения температуры с введёнными поправками.

– Для пересчёта зарегистрированных в свае значений температуры в значения эффективного радиуса используются два метода: пересчёт на основании одной калибровочной точки или пересчёт на основании нескольких калибровочных точек.

5.3.5 Интерпретация данных

– Интерпретация данных термометрического метода заключается в подготовке выводов о сплошности, а также смещении и наклоне арматурного каркаса испытываемой сваи на основании комплексного анализа результатов обработки зарегистрированных данных и дополнительной априорной информации.

– Интерпретация данных включает анализ температурных профилей: выделение локальных аномалий температуры и анализ графиков изменения эффективного радиуса сваи в зависимости от глубины.

– На первом этапе интерпретации выполняется анализ отклонения температурных профилей, зарегистрированных в диаметрально противоположных трубах

доступа, от средних значений с целью выявления смещения или наклона арматурного каркаса сваи относительно оси сваи.

– На втором этапе интерпретации для каждого профиля проводится выделение локальных отклонений значений температуры от нормы и анализ выявленных аномалий с привлечением дополнительной информации. Нарушение сплошности бетона сваи приводит к локальному снижению значений температуры. Уширение ствола сваи приводит к локальному повышению значений температуры.

– Контрастные изменения температуропроводности отдельных ИГЭ могут приводить к аномальному изменению значений температуры на температурных профилях. Если в результате совместного анализа характерных особенностей температурных профилей с имеющимися данными об инженерно-геологических условиях температурная аномалия интерпретируется в качестве изменения температуропроводности вмещающей среды, в температурные профили на данном участке допустимо ввести поправки.

– На третьем этапе интерпретации проводится анализ графиков изменения эффективного радиуса в зависимости от глубины, полученных в результате пересчёта значений температуры в значения эффективного радиуса.

5.4 Возможности и ограничения методов

Сейсмоакустический метод:

- позволяет обнаружить и локализовать по глубине значительные неоднородности ствола сваи:
 - резкие изменения поперечного сечения сваи, составляющие не менее $\pm 25\%$ от площади сваи;
 - включения инородного материала в бетоне сваи, составляющие не менее 25% от площади сваи, акустическая жёсткость которых значительно отличается от акустической жёсткости бетона сваи;
- в случае повышенных значений акустической жёсткости вмещающей среды (скальные грунты, плотные глины и др.) и/или повышенных значений отношения длина/диаметр испытываемой сваи не всегда возможно выделение отражения от нижнего конца сваи и контроль сплошности сваи.
- Метод испытаний не позволяет контролировать длину и сплошность свай с ненормируемыми по размерам сечения и материалу характеристиками (свай-РИТ; СФА-свай, изготовленных в неоднородных грунтах; грунтоцементных свай).
- В случае наличия на зарегистрированных сигналах значительных акустических аномалий и/или высокого уровня помех не всегда возможно выделение отражения от нижнего конца сваи и контроль сплошности сваи. В большинстве случаев метод испытаний не позволяет определить сплошность сваи ниже первой значительной акустической аномалии.
- Метод испытаний не позволяет обнаружить нарушения сплошности у нижнего конца сваи (на участке в пределах около 10% от длины сваи) и надёжно выделить нарушения сплошности в верхней части сваи (на участке примерно 1-2 м или примерно 2-3 диаметра сваи в зависимости от того, какое значение больше).
- Метод испытаний не позволяет определить геометрические размеры и физические свойства нарушений сплошности и сделать вывод о природе выявленных нарушений сплошности.

Ультразвуковой метод:

- позволяет контролировать сплошность бетона свай любой длины от нижней отметки труб доступа до верхней отметки бетона конструкции;
- позволяет производить оценку геометрических размеров и физических свойств выявленных нарушений сплошности бетона сваи при использовании дополнительных исследований по методике межскважинной ультразвуковой томографии;
- позволяет производить приблизительную оценку прочности бетона конструкции при условии ввода поправок в измеряемую скорость прохождения волны и проведения дополнительных измерений для локализации зон нарушения сплошности.
- Метод требует предварительного определения и подготовки свай для проведения испытаний – установки труб доступа в состав арматурного каркаса.
- Метод испытаний не позволяет сделать вывод о сплошности бетона конструкции за пределами плоскостей между осями труб доступа, в том числе вывод о сплошности защитного слоя бетона.

– Метод испытаний не предназначен для контроля сплошности бетона свай диаметром менее 500 мм.

– Метод испытаний не позволяет сделать вывод о природе выявленных нарушений сплошности.

Термометрический метод:

– позволяет проводить контроль сплошности бетона и осуществлять приёмку свай в минимальные сроки после её изготовления;

– позволяет обнаружить изменения поперечного сечения свай, включения бетона с нарушенным составом или инородного материала в свае как внутри, так и снаружи арматурного каркаса;

– позволяет локализовать по глубине нарушения сплошности бетона свай, производить оценку их расположения и геометрических размеров;

– позволяет обнаружить смещение или наклон арматурного каркаса свай относительно оси свай;

– позволяет производить оценку эффективного радиуса испытываемой свай;

– позволяет контролировать сплошность длинных свай небольшого диаметра (менее 500 мм), для которых ограничено применение ультразвукового и сейсмоакустического методов контроля сплошности свай.

– Метод требует предварительного определения и подготовки свай для проведения испытаний – установки труб доступа в состав арматурного каркаса.

– Сроки проведения испытаний определены и ограничены интервалом времени, когда температура в свае близка к максимальным значениям.

– Метод испытаний не позволяет сделать вывод о природе выявленных нарушений сплошности.

– Метод испытаний не позволяет обнаружить нарушения сплошности небольших геометрических размеров, удалённые от труб доступа.

6. Контроль качества одиночных грунтоцементных свай

6.1 Сейсмоакустический каротаж

6.1.1 Методика проведения работ

– Использование сейсмоакустического каротажа для обследования ГЦС состоит в возбуждении упругих волн в заполненной флюидом скважине в теле сваи и в регистрации приёмником колебаний волн разных типов, распространяющихся по жидкости, внутренней поверхности ствола скважины, телу сваи и окружающей сваю породе (рисунок 6.1). Скорости распространения этих волн, их динамические характеристики и спектральный состав несут информацию о геометрии и упругих параметрах тела сваи.

– Теоретической основой контроля качества одиночных ГЦС является теория распространения упругих объёмных волн давления в заполненной жидкостью цилиндрической полости с податливыми стенками. Задаче контроля качества ГЦС отвечает низкочастотная асимптотика, когда преобладающая длина упругой волны намного превышает радиус цилиндрической полости.

– Формула для скорости распространения упругой волны давления V в «трубе с бесконечно толстыми стенками» (аналог скважины, расположенной внутри ГЦС) определяется свойствами заполняющей скважину жидкости и сдвиговой характеристикой околоскважинного пространства:

$$V = V_0 \sqrt{\frac{\mu}{\mu + k}}, \quad (6.1)$$

где μ – модуль сдвига бесконечно толстой стенки трубы (околоскважинного пространства);

$k = \rho_0 V_0^2$ – модуль объёмной упругости жидкости;

ρ_0 – плотность жидкости;

V_0 – скорость звука в жидкости.

– При создании импульсного избыточного давления в заполняющей скважину жидкости в околоскважинном пространстве в теле ГЦС возникает поле давления, состоящее из двух типов волн: объёмной волны давления и гидроволны, связанной с наличием цилиндрической полости.

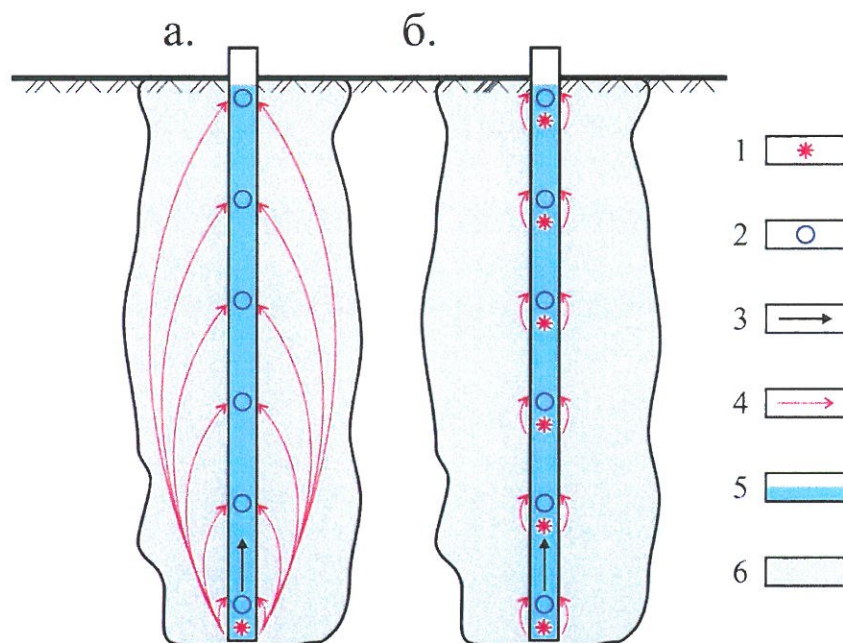
– По временам пробега волн при известном взаимном расположении источника и приёмника колебаний и траекториях пробега волн рассчитываются скорость распространения продольной объёмной волны V_p и гидроволны V_r , которая определяется по формуле

$$V_r = V_0 / \sqrt{1 + \rho_0 V_0^2 / \mu}. \quad (6.2)$$

– Через определённое при анализе волновой картины значение V_r можно выразить значение скорости поперечных волн V_s с использованием формулы Уайта:

$$V_s = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho} \frac{V_r^2 V_0^2}{V_0^2 - V_r^2}}, \quad (6.3)$$

где ρ – плотность материала ГЦС.



а – потенциальный каротаж, б – дифференциальный каротаж. Обозначения: 1 – источник колебаний; 2 – приёмник колебаний; 3 – направление перемещения датчиков; 4 – траектории распространения упругих волн; 5 – скважина, заполненная водой; 6 – грунтоцементная свая

Рисунок 6.1– Системы наблюдений и лучевые схемы при сейсмоакустическом контроле качества одиночной ГЦС

– Переход от определённых значений скоростей упругих волн и плотности материала к пределу прочности материала $\sigma_{сж}$ осуществляется по корреляционным зависимостям, полученным в результате многочисленных сопоставлений с прямыми определениями предела прочности по образцам керна.

– Спектральные характеристики зарегистрированных волн и знание их скоростей позволяют определить времена прихода колебаний, дошедших от источника до границы между телом сваи и естественным грунтом, и на этом основании рассчитать эффективный диаметр сваи D :

$$D = V_p / 2F, \quad (6.4)$$

где F – частота минимума модуля спектра.

– Контроль качества одиночной ГЦС выполняется в три этапа (цикла).

– В первом цикле наблюдений измерения выполняются по методике «потенциального каротажа» (рисунок 6.1, а). Один из датчиков (источник или приёмник) располагается неподвижно на забое скважины, в то время как второй (приёмник или источник, соответственно) перемещается по стволу скважины с заданным шагом, обычно не превышающим 0,5 м, до устья.

– Второй цикл наблюдений ведётся по методике «дифференциального каротажа» (рисунок 6.1, б). Источник и приёмник фиксируются на постоянной базе, обычно в 1,0 м, и совместно перемещаются снизу вверх по стволу скважины с шагом не более 0,5 м.

– Третий цикл наблюдений также ведётся по методике «дифференциального каротажа», на увеличенной до 2,0 м базе между источником и приёмником. Шаг между точками наблюдения составляет не более 0,5 м.

– Сроки проведения испытаний назначаются исходя из набора необходимой прочности грунтоцементом и составляют порядка 17 суток (не менее 14) от сооружения конструкции.

6.1.2 Подготовка к проведению испытаний

– Для уточнения методики проведения испытаний, разработки программы испытаний, последующей интерпретации результатов и составления Технического отчёта следует использовать проектную и исполнительную документацию.

– Доступ к внутренним точкам ГЦС осуществляется с использованием предварительно изготовленной измерительной скважины. Скважина должна располагаться максимально близко к положению лидерной скважины, использованной при сооружении сваи.

– Забой измерительной скважины должен располагаться ниже проектного конца сваи. Диаметр измерительной скважины должен составлять не менее 80 мм. Обсадка скважины не требуется. Обязательно заполнение скважины технической водой перед проведением испытаний.

– Если при отборе керна из скважины будут выделены интервалы с включением неустойчивых грунтов, должно быть принято решение о браковке сваи либо об обсадке скважины и продолжении исследований.

6.1.3 Аппаратура

– Аппаратурный комплекс для сейсмоакустического каротажа включает в себя систему для возбуждения (электроискровой источник) и регистрации (скважинный зонд) колебаний и блок регистрации колебаний (регистратор и персональный компьютер).

– Наиболее удобным источником упругих волн является электрический разряд в жидкости. Технически излучатель может быть реализован в виде контейнера с гибкими стенками, заполненного солёной водой, где размещены разрядные электроды.

– Контейнер диаметром, не превышающий 50 мм, и длиной не более 1,0 м расположен на конце токоведущей магистрали – коаксиального высоковольтного кабеля диаметром 10-15 мм – и свободно перемещается по стволу скважины.

– На поверхности токоведущая магистраль подключается к блоку возбуждения (накопительному блоку), включающему в себя накопительные конденсаторы, схему заряда, высоковольтный коммутатор, а также схему управления и синхронизации с приёмно-регистрирующей аппаратурой.

– Источником питания установки служит бытовая электросеть 220 В/50 Гц. Потребляемая мощность зависит от величины накопленной электрической энергии и от числа циклов «заряд-разряд» в единицу времени. Необходимая электрическая энергия разряда для работы в скважинах глубиной до 50 м не превышает 150 Дж. При одном цикле в секунду потребляемая мощность не превышает 150 Вт.

– Приём упругих волн давления осуществляется с помощью зонда с гибкими стенками диаметром не более 40 мм и длиной не более 0,5 м на один канал, содержащего внутри пьезоприёмники (гидрофоны). Зонд размещён на конце многожильного экранированного кабеля диаметром 5-6 мм, соединяющего приёмники с регистрирующей аппаратурой на поверхности.

– Регистратор представляет собой цифровую систему сбора и хранения информации на базе любого стандартного АЦП, аналогового усилителя, подключаемую к компьютеру.

– В комплект блока регистрации входит персональный компьютер, позволяющий сохранять регистрируемые данные и выполнять визуальный контроль качества регистрируемых данных.

6.1.4 Обработка данных

– Граф обработки включает в себя следующие процедуры:

– Редакция записанных трасс, контроль качества и монтаж итоговых сейсмограмм в координатах «время-глубина» для всего ствола скважины.

– Кинематическая обработка сейсмограмм с построением годографов волн двух типов – объёмных продольных волн и гидроволн. Определение скоростей распространения волн V_p и V_r . Фиксация глубин образования вторичных волн обоих типов на возможных неоднородностях сваи.

– Расчёт скоростей распространения поперечных волн V_s по формуле (6.3). Построение скоростной модели разреза по значениям V_p и V_s .

– Расчёт динамического модуля сдвига μ околоскважинного пространства по формуле (6.2). Расчет предела прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ с использованием корреляционных зависимостей.

– Спектральный анализ волн двух типов. Выбор окон расчёта спектров продольной волны и гидроволн. Построение модулей спектров для двух типов волн вдоль ствола скважины. Определение эффективного диаметра сваи по формуле (6.4).

6.1.5 Интерпретация данных

– При интерпретации результатов потенциального каротажа по выделенным годографам продольных волн и гидроволн определяются скорости распространения продольных волн, гидроволн и поперечных волн с различными окнами осреднения от шага между положениями приёмников до интервала исследований.

– При интерпретации результатов дифференциального каротажа выделяются интервалы резких изменений скорости распространения продольных волн и гидроволн, а также анализируются спектры колебаний для определения эффективного диаметра скважины в зависимости от глубины.

– Отклонения всех параметров от средних значений по стволу измерительной скважины трактуются как аномально дефектные участки ГЦС.

6.2 Возможности и ограничения метода

- Сейсмоакустический каротаж:
- позволяет оценить степень однородности грунтоцементной сваи в параметрах вариации предела прочности на одноосное сжатие грунтоцемента;
- позволяет дать оценку упругих и прочностных характеристик материала ГЦС в зависимости от глубины;
- позволяет дать оценку эффективного диаметра конструкции.
- Среднюю точность определения параметров исследуемой ГЦС по данным сейсмоакустического каротажа можно оценить величиной 10%.
- Метод не позволяет определять форму реального сечения сваи.
- Метод требует подготовки свай для проведения испытаний – бурения измерительной скважины определённого диаметра глубиной более длины сваи и заполнения её технической водой.

7. Контроль качества «стен в грунте» траншейного и свайного типа

7.1 Ультразвуковой метод

7.1.1 Методика проведения работ

– Контроль сплошности бетона «стен в грунте» траншейного (ТСГ) и свайного (ССГ) типа ультразвуковым методом основан на анализе параметров ультразвуковых волн (скорость распространения и затухание) с целью получения выводов о сплошности бетона отдельных элементов конструкции (захваток ТСГ и свай ССГ) и о состоянии контакта (зоны стыка) между соседними элементами.

– Методика проведения работ рассматриваемым методом соответствует описанной в п. 5.2.1 настоящего Руководства методике контроля качества одиночных БНС ультразвуковым методом.

7.1.2 Подготовка к проведению испытаний

– Для уточнения методики проведения испытаний, разработки Программы испытаний, последующей интерпретации результатов и составления Технического отчёта следует использовать проектную и исполнительную документацию.

– Для проведения испытаний в тело конструкции в составе арматурного каркаса должны быть установлены стальные или полимерные трубы доступа. Рекомендации к установке труб доступа соответствуют п. 5.2.2 настоящего Руководства.

– Рекомендуемые схемы взаимного расположения труб доступа и профилей наблюдения в пределах отдельных элементов изучаемой конструкции представлены на рисунке 7.1. Трубы доступа должны располагаться в пределах сечения таким образом, чтобы база измерений для профиля наблюдений не превышала 1,5 м.

– Расположение труб доступа при исследовании ТСГ и ССГ из БСС следует выбирать таким образом, чтобы существовала возможность выполнения измерений для проверки состояния зоны стыка между соседними элементами конструкции.

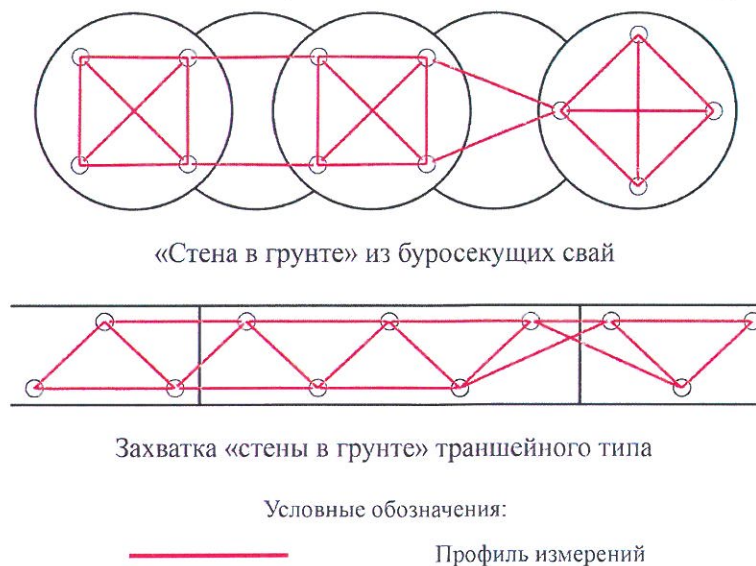


Рисунок 7.1 – Рекомендуемая схема расположения труб доступа и профилей измерений

7.1.3 Аппаратура

– Требования к оборудованию для проведения испытаний соответствуют требованиям, представленным в п. 5.2.3 настоящего Руководства.

7.1.4 Обработка данных

– Рекомендации по обработке данных ультразвукового метода приведены в п. 5.2.4 настоящего Руководства.

7.1.5 Интерпретация данных

– Рекомендации по интерпретации результатов использования ультразвукового метода приведены в п. 5.2.5 настоящего Руководства.

– Приведённые в п. 5.2.5 количественные критерии выделения и анализа значительных и незначительных ультразвуковых аномалий в общем случае неприменимы для профилей измерений, зарегистрированных через зоны стыка захваток ТСГ / соседних армированных свай ССГ.

– При интерпретации результатов ультразвукового профилирования для оценки контакта между элементами конструкции следует сравнивать полученные результаты с результатами измерений через другие зоны стыка.

7.2 Межскважинные сейсмоакустические прозвучивания

7.2.1 Методика проведения работ

– Межскважинные сейсмоакустические прозвучивания могут быть использованы для контроля качества «стены в грунте» траншейного или свайного типа до контрольных испытаний с применением ультразвукового метода или как единственный геофизический метод в том случае, если проведение контрольных испытаний с применением ультразвукового метода оказалось невозможным по каким-либо весомым причинам.

– Сниженная относительно ультразвуковых измерений разрешающая способность метода может привести к пропуску дефектов конструкции размерами менее 0,5-1,0 м.

– Методика проведения работ описана в п. 8.2.1 настоящего руководства.

7.2.2 Подготовка к проведению испытаний

– Для уточнения методики проведения испытаний, разработки Программы испытаний, последующей интерпретации результатов и составления Технического отчёта следует использовать проектную и исполнительную документацию.

– Для проведения испытаний в тело конструкции в составе арматурного каркаса должны быть установлены полимерные трубы доступа внутренним диаметром не менее 80 мм.

– Рекомендации к установке труб доступа соответствуют п. 5.2.2 настоящего Руководства.

– Взаимное расположение труб доступа в пределах изучаемой конструкции выбирается исходя из необходимости равномерного покрытия внутреннего объёма конструкции сетью наблюдений. Расстояние между соседними трубами доступа составляет не менее 5,0 м.

7.2.3 Аппаратура

– Требования к оборудованию для проведения испытаний соответствуют требованиям, представленным в п. 6.1.3 настоящего Руководства.

7.2.4 Обработка данных

– Рекомендации по обработке данных межскважинных сейсмоакустических прозвучиваний приведены в п. 8.2.4 настоящего Руководства.

7.2.5 Интерпретация данных

– Рекомендации по интерпретации результатов использования межскважинных сейсмоакустических прозвучиваний приведены в п. 8.2.5 настоящего Руководства.

7.3 Термометрический метод

7.3.1 Методика проведения работ

– Термометрический метод контроля качества «стен в грунте» траншейного и свайного типа основан на измерении температуры в теле конструкции в процессе твердения бетона с целью получения сведений о сплошности бетона сооружения.

– Методика проведения работ описана в п. 5.3.1 настоящего Руководства.

7.3.2 Подготовка к проведению испытаний

– Для уточнения методики проведения испытаний, разработки Программы испытаний, последующей интерпретации результатов и составления Технического отчёта следует использовать проектную и исполнительную документацию.

– Для проведения испытаний в тело конструкции в составе арматурного каркаса должны быть установлены стальные или полимерные трубы доступа. Рекомендации к установке труб доступа соответствуют п. 5.2.2 настоящего Руководства.

– Присутствие жидкостей (воды, бентонита и др.) перед и в процессе проведения испытаний в трубах доступа не допускается. Во избежание попадания в полость труб доступа бурового раствора, цементного молока, грунтового материала и пр. на верхнем и нижнем концах труб должны быть установлены герметичные заглушки.

– Рекомендуемые схемы взаимного расположения труб доступа в пределах отдельных элементов изучаемой конструкции представлены на рисунке 7.1.

7.3.3 Аппаратура

– Требования к оборудованию для проведения испытаний соответствуют требованиям, представленным в п. 5.3.3 настоящего Руководства.

7.3.4 Обработка данных

– Рекомендации по обработке данных термометрического метода приведены в п. 5.3.4 настоящего Руководства.

7.3.5 Интерпретация данных

– Рекомендации по интерпретации результатов использования термометрического метода приведены в п. 5.3.5 настоящего Руководства.

– При анализе температурных профилей, полученных при измерениях на траншейной «стене в грунте», необходимо учитывать положение труб доступа в пределах захватки – для расположенных вблизи геометрического центра конструкции труб доступа уровень абсолютных значений температуры будет выше, чем у труб доступа, расположенных по боковым торцам.

7.4 Сейсмоакустический метод

7.4.1 Методика проведения работ

– Сейсмоакустический метод допустимо использовать для контроля качества «стен в грунте» траншейного и свайного типа только в том случае, если в состав арматурного каркаса конструкции не были включены трубы доступа.

– При проведении испытаний свайной «стены в грунте» возможно использование методики поверхностного сейсмоакустического метода для определения глубины заложения конструкции и наличия в её теле крупных дефектов согласно рекомендациям п. 5.1.1 настоящего Руководства.

– При проведении испытаний траншейной «стены в грунте» при наличии доступа к участку верхнего торца, длина которого сопоставима или превышает глубину заложения конструкции, возможна адаптация методик профилирования из наземной сейсморазведки: профилирование с совмещённым источником и приёмником, профилирование с общим пунктом возбуждения (ОПВ) (рисунок 7.2).

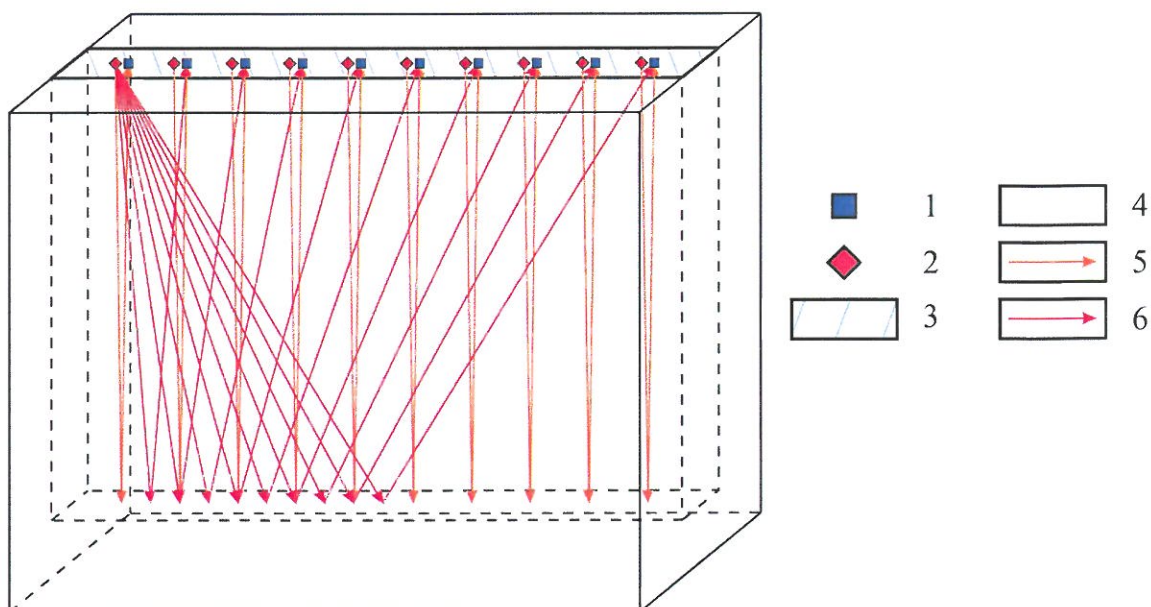
– Полученные в результате сейсмограммы используются для выделения годографа волны, отражённой от нижнего торца конструкции, для оценки глубины её заложения и могут быть (при условии малой зашумлённости сигналов) использованы для поиска значительных по геометрическим размерам дефектов материала конструкции.

– Сейсмограммы, полученные по результатам профилирования с ОПВ, могут анализироваться на предмет наличия годографов направленных волн согласно рекомендациям п. 10.1.1 настоящего Руководства.

– При обследовании ССГ из БКС испытания должны выполняться для каждой из свай в составе конструкции на всём протяжении обследуемого участка.

– При обследовании ССГ из БСС испытания должны выполняться для каждой из армированных свай в составе конструкции на всём протяжении обследуемого участка.

– При обследовании ТСГ расстояние между соседними точками расположения приёмника не должно превышать 0,5 м.



1 – приёмники; 2 – источники; 3 – «стена в грунте»; 4 – вмещающий грунт; 5 – траектории отражённых волн при профилировании с совмещённым источником и приёмником; 6 – траектории отражённых волн при профилировании с ОПВ

Рисунок 7.2 – Расположение источников и приёмников колебаний при исследовании участка траншейной «стены в грунте»

7.4.2 Подготовка к проведению испытаний

- При обследовании ССГ подготовка отдельных свай к проведению испытаний осуществляется согласно рекомендациям п. 5.1.2 настоящего Руководства.
- При обследовании ТСГ площадки для возбуждения и регистрации сигнала подготавливаются вдоль направляющей оси конструкции (рисунок 7.2) с выбранным шагом съёмки.

7.4.3 Аппаратура

- Используемый прибор должен удовлетворять требованиям к аппаратуре, перечисленным в п. 5.1.3 настоящего Руководства.
- При обследовании ТСГ в ходе работ по методике профилирования с ОПВ используемый прибор должен обеспечивать возможность регистрации колебаний с изменяющейся базой между источником и приёмником (за счёт наличия нескольких каналов записи или возможности использования датчика «момента удара»).

7.4.4 Обработка данных

- Полученные в результате профилирования с совмещённым источником и приёмником сейсмограммы обрабатываются согласно рекомендациям п. 5.1.4 настоящего Руководства.
- Сейсмограммы, полученные по результатам профилирования с общим пунктом возбуждения, могут быть обработаны с применением подходов из наземной сейсморазведки согласно рекомендациям п. 10.1.4 настоящего Руководства.

7.4.5 Интерпретация данных

- Интерпретации результатов испытаний ССГ ведётся с использованием рекомендаций из п. 5.1.5 настоящего Руководства.

– Интерпретация результатов испытаний ТСГ ведётся с использованием рекомендаций из п. 10.1.5 настоящего Руководства.

7.5 Возможности и ограничения методов

– Возможности и ограничения применения ультразвукового и термометрического методов для контроля качества свайных и траншейных «стен в грунте» соответствуют описанным в п. 5.4 настоящего Руководства.

– Приоритетным в отношении решаемой задачи (контроль качества скрытых работ) при обследовании «стен в грунте» является совместное использование ультразвукового и термометрического методов.

– Равномерное покрытие изучаемого сооружения сетью профилей наблюдения через установленные в составе арматурного каркаса трубы доступа позволяет:

– при использовании ультразвукового метода получить представление о наличии наиболее распространённых дефектов (дефекты сплошности материала захватки/сваи; дефекты зоны стыка между соседними элементами конструкции; снижение качества бетона сооружения в верхней и нижней части);

– при совместном использовании термометрического и ультразвукового методов можно дать качественную оценку состоянию материала вне зоны, покрытой ультразвуковыми профилями, обнаружить перерасход цементного раствора.

– Межскважинные сейсмоакустические просвечивания обладают существенно меньшей разрешающей способностью в сравнении с ультразвуковым методом, и поэтому в общем случае не рекомендуются для изучения «стен в грунте», однако могут использоваться как в качестве вспомогательного метода вместе с ультразвуковыми и термометрическими измерениями, так и в случае, если в арматурный каркас конструкции не было установлено достаточное число труб доступа для её равномерного изучения с использованием ультразвукового профилирования.

– Поверхностный сейсмоакустический метод может использоваться для изучения «стены в грунте» только в случае, если в тело конструкции не были установлены трубы доступа, так как обладает наименьшей точностью получаемых результатов. Однако в ситуации, когда отсутствует иная возможность получить информацию о состоянии сооружения, методы наземного акустического профилирования могут дать информацию о глубине заложения конструкции и о наличии значительных дефектов.

8. Контроль качества грунтоцементных массивов

8.1 Сейсмоакустический каротаж

8.1.1 Методика проведения работ

– Контроль качества грунтоцементных массивов с применением сейсмоакустического каротажа основан на анализе параметров упругих волн, возбуждаемых в примыкающей к скважине области закрепления грунта, с целью получения выводов о степени однородности массива и оценки его физико-механических характеристик.

– Методика проведения работ данным методом соответствует описанной в п. 6.1.1 настоящего Руководства методике потенциального каротажа одиночных грунтоцементных свай.

8.1.2 Подготовка к проведению испытаний

– Для проведения испытаний в грунтоцементном массиве должны быть организованы скважины. Рекомендации к расположению скважин даны в п. 8.2.2 настоящего Руководства.

– Рекомендации по подготовке скважин к проведению измерений даны в п. 6.1.2 настоящего Руководства.

8.1.3 Аппаратура

Требования к аппаратуре для проведения сейсмоакустического каротажа даны в п. 6.1.3 настоящего Руководства.

8.1.4 Обработка данных

Рекомендации по обработке данных потенциального каротажа даны в п. 6.1.4 настоящего Руководства.

8.1.5 Интерпретация данных

– Рекомендации по интерпретации результатов потенциального каротажа даны в п. 6.1.5 настоящего Руководства.

– Особенностью анализа данных потенциального каротажа при обследовании грунтоцементного массива, в отличие от обследования одиночной ГЦС, является отсутствие необходимости анализа модулей спектров колебаний в связи с отсутствием границ между поверхностью свай и вмещающим грунтом и необходимости оценки эффективного диаметра.

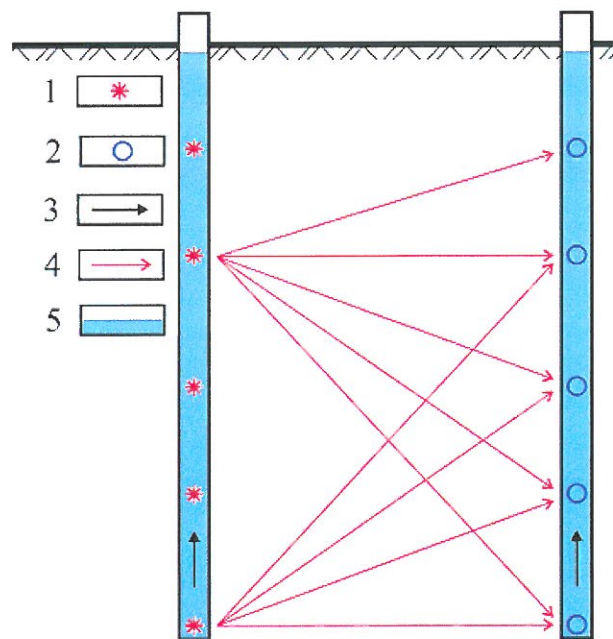
8.2 Межскважинные сейсмоакустические прозвучивания

8.2.1 Методика проведения работ

– Межскважинное сейсмоакустическое просвечивание (МСП) используется для оценки степени однородности и физико-механических характеристик грунтоцементного массива.

– Методика МСП предполагает размещение в двух скважинах, расположенных на некотором расстоянии одна от другой, источников и приёмников сейсмических волн. Производится последовательное возбуждение сигналов в одной скважине, приём и регистрация волн другой. Образованные пары «источник – приёмник» создают плотную сеть лучей, заполняющую пространство между скважинами (рисунок 8.1). Получаемые в

результате записи позволяют узнать времена прихода сейсмических волн и определить их скорость для каждой пары «источник – приёмник».



1 – источник колебаний; 2 – приёмник колебаний; 3 – направление перемещения датчиков; 4 – траектории распространения упругих волн; 5 – скважина

Рисунок 8.1 – Системы наблюдений и лучевые схемы при межскважинном просвечивании

– Просвечивание между скважинами осуществляется по схеме томографической съёмки – для каждого положения точки возбуждения используются все положения точки приёма.

– Использование алгоритма сейсмической кинематической томографии позволяет определить распределение скорости распространения сейсмических волн в пределах массива закреплённых грунтов в межскважинном пространстве.

– Принципиальная расчётная схема метода томографии SIRT – Simultaneous Iterative Reconstruction Technique (рисунок 8.2):

– Задаётся начальная модель, основанная на априорной информации. Одним из наиболее надёжных оснований для построения начальной модели являются результаты потенциального каротажа скважин, участвующих в МСП.

– Затем начинается итерационный процесс, состоящий из нескольких операций. Для текущей модели (для первой итерации это будет начальная модель) выполняется расчёт прямой задачи, т.е. расчёт характеризующих модель параметров: значений скорости распространения волн и, соответственно, времён их прихода к приёмникам.

– Затем результат расчёта прямой задачи сравнивается с наблюдаемыми данными, и если разница (невязка) между ними достаточно велика, в модель вносятся изменения, призванные уменьшить эту разницу.

– Предполагается, что спустя некоторое число итераций будет получена конечная модель, достаточно удовлетворительно описывающая изучаемую среду.

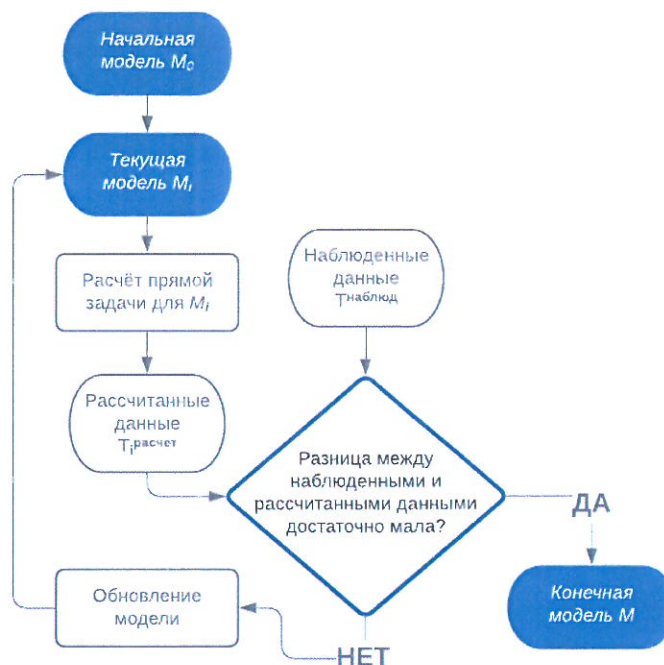


Рисунок 8.2 – Блок-схема алгоритма сейсмической томографии

– Вопрос о числе накоплений при неизменном положении источника и приёмника решается в зависимости от уровня механических шумов во время производства сейсмоакустических работ. Реальное число накоплений обычно не превышает 20.

– Для достижения соотношения «сигнал/шум» 5 и более в области времён прихода проходящей через массив волны предпочтение отдаётся увеличению числа накоплений перед увеличением энергии разряда.

8.2.2 Подготовка к проведению испытаний

– Для реализации МСП необходимо несколько контрольных скважин, пробурённых в изготовленном грунтоцементном массиве, заполненных технической водой и имеющих внутренний диаметр не менее 80 мм.

– Число и расположение контрольных скважин определяются требованиями организации, проводящей контроль качества изготовленного грунтоцементного массива.

– Вопрос о выборе межскважинного расстояния требует особого внимания. Оптимальным является равенство расстояния между скважинами и величины интервала закрепления грунтов по глубине. Отклонения в ту или другую сторону допустимы не более чем на 30%.

8.2.3 Аппаратура

– Требования к аппаратуре для проведения сейсмоакустического каротажа даны в п. 6.1.3 настоящего Руководства.

8.2.4 Обработка данных

– Граф обработки данных, собранных по методике межскважинной томографии, включает в себя следующие процедуры:

– Монтаж записанных трасс в сейсмограммы ОПВ, визуальный контроль качества;

- Пикировка первых вступлений волн для всех положений источников и приёмников в двух скважинах в варианте 2D и всех участвующих в обследовании грунтоцементного массива – в варианте 3D томографии;
- Составление входных массивов для программы томографического обращения $\{X_{и}; Y_{и}; Z_{и}; X_{п}; Y_{п}; Z_{п}; t\}$ – координаты источника, координаты приёмника и время пробега волны от источника к приёмнику.
- Составление матрицы начальной модели скоростного строения межскважинного пространства с использованием результатов потенциального каротажа для скважин, участвующих в просвечивании, и результатов расчёта средних скоростей распространения по лучам для равных глубин расположения источников и приёмников;
- Расчёт двух- или трёхмерной сетки для модели скоростного строения разреза или куба;
- Построение скоростной модели 2D-разреза или 3D-грунтоцементного массива по значениям скорости распространения продольных волн V_p и, при выполнении специальных наблюдений, по значениям скорости распространения поперечных волн V_s .
- Расчёт предела прочности на одноосное сжатие с использованием корреляционных зависимостей и пересчёт разреза или куба в значения предела прочности на одноосное сжатие.
- Анализ степени однородности грунтоцементного массива.

8.2.5 Интерпретация данных

- Интерпретация результатов МСП, выполненного для контроля качества закрепления грунтового массива, разделяется на три этапа.
- Первый этап состоит в выделении аномальных значений скорости продольных волн в межскважинном пространстве по следующим признакам: по признаку отклонения значения скорости от среднего; статистической оценки интенсивности и геометрических размеров (площади на разрезе) выделенных аномалий.
- Второй этап состоит в выделении аномалий отклонения предела прочности на одноосное сжатие по абсолютным значениям от среднего из определённых и от проектного значения.
- Третий этап состоит в привязке сейсмоакустических данных к данным лабораторных определений по кернам, извлечённым из измерительных скважин.

8.3 Возможности и ограничения методов

- Сейсмоакустические методы исследования искусственно закреплённых массивов позволяют оценить качество закрепления грунтов грунтоцементными секущими сваями.
- Качество грунтоцементного массива выражается в количественной мере предела прочности на одноосное сжатие в зависимости от координат произвольной точки в грунтоцементном массиве.
- В приведённом в Руководстве варианте сейсмоакустического обследования грунтоцементных массивов невозможно описание массива в значениях скорости распространения поперечных волн и динамических упругих модулей соответственно.

9. Контроль качества тампонажа заобделочного пространства тоннелей

9.1 Акустический метод

9.1.1 Методика проведения работ

– Акустические методы позволяют оценить интегральные характеристики обделки и охарактеризовать состояние контакта между конструкциями тоннеля и заобделочным пространством. Обследование ведётся с применением двух подходов: импакт-метода (impact-echo method) и виброакустического метода (impulse response method), которые отличаются частотными диапазонами и имеют разную разрешающую способность в плане.

– Виброакустический метод применяется для обнаружения крупных нарушений контакта (от 1 м в плане и более). В основе метода лежит явление возникновения изгибных колебаний объёма среды, через который распространяются акустические волны, между дефектом и свободной поверхностью.

– Исследование состояния контакта основано на анализе акустических колебаний плиты, возбуждаемых ударом, направленным по нормали к поверхности обделки. Длительность акустического импульса отклика характеризует степень плотности контактного слоя. В случае нарушения контакта с грунтом наблюдается т.н. «звон» обделки тоннеля – заметный рост продолжительности и амплитуды основного цуга колебаний.

– Возбуждаемые изгибные колебания обделки находятся в низкочастотном диапазоне спектра Фурье. Для предварительной оценки диапазона частот возникающих изгибных колебаний можно использовать модель шарнирно опёртой по контуру пластины. Собственные частоты колебания пластины определяются формулой

$$\omega_{m,n} = \pi^2 \left\{ \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right\} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}}, \quad (9.1)$$

где a и b – соответственно длина и ширина пластины;

h – толщина пластины;

E и μ – модуль Юнга и модуль сдвига соответственно;

$m, n = 1, 2, 3, \dots$

Для низшей моды колебаний ω_1 соответственно $m = n = 1$, т. е. формула принимает вид

$$\omega_1 = \pi^2 \left\{ \frac{a^2 + b^2}{a^2 b^2} \right\} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}}. \quad (9.2)$$

– Обследование ведётся с шагом между сечениями в 5–10 колец. Точки возбуждения и регистрации данных равномерно распределяются по внутренней поверхности выбранного для обследования сегмента обделки (рисунок 9.1, а).

– Для возбуждения колебаний обделки используются металлические и резиновые молотки или ударник в виде стального шара на сборной досылочной штанге (рисунок 9.1, б).

– Приёмник колебаний также крепится на сборную штангу, что позволяет обследовать всё сечение тоннеля без использования специальных временных конструкций и лестниц.

– В каждой точке производится серия из не менее чем пяти ударов, результаты измерений усредняются. Для определения спектральной характеристики колебаний на

каждой точке измерения возможна регистрация до 20 трасс (накоплений) сейсмических колебаний в зависимости от условий работ.

– Удары молотка производят в разных точках вблизи расположения приёмного датчика. Это позволяет при последующей обработке устранить влияние габаритных и структурных резонансов, возникающих в конструкции.

– В процессе работы ведётся полевой журнал, в который записываются номера файлов, содержащих волновые формы, особенности геометрии сооружения, значения привязок, значения пикетажных табличек, описываются факторы, способные повлиять на результат измерений, и пр.

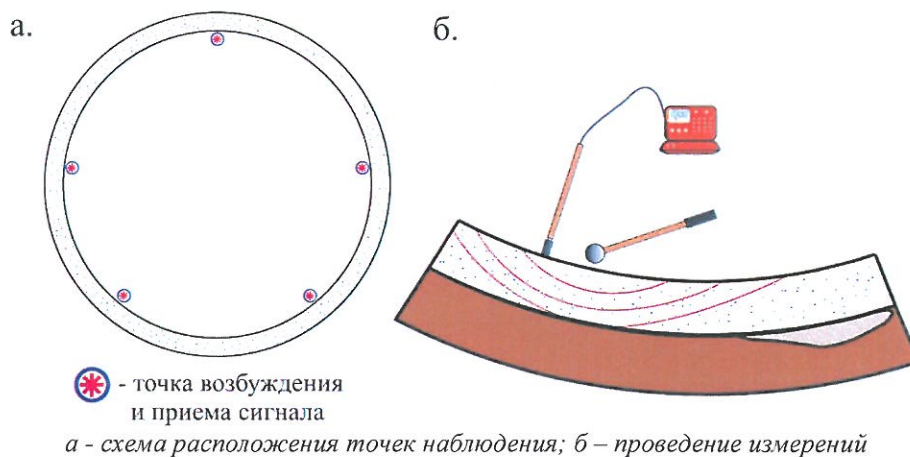


Рисунок 9.1 – Методика акустического обследования обделки тоннеля

– Импакт-метод позволяет обнаруживать дефекты, плановый размер которых составляет десятки сантиметров и поэтому используется для детальных работ.

– Метод основан на использовании явления «толщинного» резонанса, заключающегося в образовании стоячих волн в обделке тоннеля в результате отражения волны от верхней и нижней поверхностей конструкции. Частоту, на которой наблюдается резонанс, можно определить по формуле

$$F_r = \frac{V_p}{2d}, \quad (9.3)$$

где V_p – скорость продольной волны в бетонной обделке;
 d – толщина обделки.

– При средней толщине обделки d от 25 до 40 см резонанс будет наблюдаться в диапазоне от 4000 до 8000 Гц. При выборе источника с центральной частотой, близкой к указанному диапазону, резонанс будет наблюдаться в спектре регистрируемого отклика.

– Методика работ импакт-методом повторяет методику работ виброакустическим методом, за исключением использования более густой сети наблюдений (определяемой исходя из необходимой разрешающей способности в плане).

– По результатам обследования составляется Технический отчёт, содержащий общее описание объекта исследования; описание типа и особенностей обделки; описание участка обследования с указанием направления обследования; результаты обследования в виде карт оценок качества тампонажа заобделочного пространства с указанием методики регистрации и обработки данных.

– Обе методики могут быть использованы не только при обследовании обделки тоннелей и шахтной крепи, но и при контроле состояния фундаментных плит и других массивных железобетонных конструкций, которые могут быть описаны как подобные плитам (толщина конструкции меньше в 6 раз и более её линейных габаритов).

9.1.2 Подготовка к проведению испытаний

– Перед началом испытаний обделки производится визуальный осмотр объекта и сбор данных о его технологическом строении и окружающей конструкции массиве грунтов. По результатам анализа имеющейся информации составляется программа испытаний, содержащая общее описание объекта исследования; описание типа и особенностей обделки; описание участка обследования с указанием направления обследования; предложения по расположению точек наблюдения и шагу между сечениями.

– Для выбора веса и типа применяемого источника колебаний производится предварительный расчёт диапазона собственных колебаний обделки и проведение натурных опытно-методических работ. Расчёт можно производить согласно формуле

$$\tau = \frac{2,94 \left\{ \frac{5}{4} m \left[\frac{1 - \vartheta_1^2}{E_1} + \frac{1 - \vartheta_2^2}{E_2} \right] \frac{3}{4} \right\}^{2/5}}{V_0^{1/5}}, \quad (9.4)$$

где $m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ – приведенная масса соударяющихся тел;

m_1 и m_2 – масса ударного источника и плиты;

E_1, E_2 и ϑ_1, ϑ_2 – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно;

R – радиус ударного источника;

V_0 – скорость нанесения удара.

Указанный подход к подбору параметров ударных источников является формальным и требует уточнения для каждого отдельного случая.

9.1.3 Аппаратура

– Используемый прибор должен удовлетворять требованиям к аппаратуре, перечисленным в п. 5.1.3 настоящего Руководства. Оборудование, применяемое для сейсмоакустических обследований свайных фундаментов и «стен в грунте», может быть использовано для выполнения работ виброакустическим методом.

– Для возможности работы импакт-методом используемая регистрирующая аппаратура должна иметь частотную характеристику, позволяющую без потерь регистрировать колебания в диапазоне 3-10 кГц.

9.1.4 Обработка данных

– Обработка данных ведётся в специализированном геофизическом программном обеспечении (ПО): GeoTechControl, GT Software, Impact_method, RadexPro и др. программные комплексы для обработки сигналов, обладающие аналогичным функционалом.

– Граф обработки данных акустического метода:

– Просмотр полевых материалов и отбраковка некачественных данных;

– Предварительная обработка данных. Реализуется ряд процедур, призванных улучшить качество данных и увеличить соотношение сигнал/шум (группировка сигналов, выравнивание трасс по амплитуде, расчёт и нормировка спектров для каждого сигнала).

– Мультипликативная обработка данных. Из-за ограниченных размеров объекта исследований наряду с искомым «толщинным» резонансом на спектральной характеристике появляются многочисленные дополнительные резонансные пики, возникающие из-за «геометрических эффектов», на фоне которых сложно однозначно определить основной искомый резонансный пик. Для решения этой проблемы применяется процедура мультипликативной обработки данных, заключающаяся в перемножении спектров сигналов, полученных для одной точки наблюдения, с изменением взаимного положения источника и приёмника.

– Построение карт различных атрибутов сигнала.

– В блок атрибутного анализа могут входить следующие виды атрибутов: максимальное абсолютное значение амплитуды; энергия нормированного сигнала; площадь нормированного спектра; средневзвешенная частота; добротность/Q-фактор (значение Q-фактора может быть определено как отношение ширины спектра отражённого сигнала, определённого по уровню 0,7 от максимума, к центральной частоте спектра); отношение площади нормированного спектра к средневзвешенной частоте.

– Атрибуты энергии нормированного сигнала E_n , площади нормированного спектра S_n и средневзвешенной частоты f_s позволяют характеризовать особенности поглощения энергии колебаний, возбуждённых в исследуемом линейно-упругом теле, и определяются согласно следующим формулам:

$$E_n = \sum_0^T A_0(t) \cdot A_0(t); \quad (9.5)$$

$$S_n = \sum_i S_0(i) \cdot df; \quad (9.6)$$

$$f_s = \frac{\sum_i (S(i) \cdot f(i))}{\sum_i S(i)}, \quad (9.7)$$

где $A_0(t)$ – значение нормированного сигнала;

$$t = 0, \dots, T, df = \frac{\Delta f}{2(n-1)};$$

Δf – частота дискретизации, n – число отсчётов в спектре;

$i = 1, 2 \dots n, S_0(i)$ – значение нормированного спектра в i -й точке;

$f(i)$ – значение частоты в i -й точке.

9.1.5 Интерпретация данных

– Интерпретация результатов носит качественный характер и заключается в разделении зон нормального и нарушенного состояний контакта «обделка-грунт».

– Основой сравнительной методики интерпретации допустимо принять отношение значения атрибута в данной точке измерений A_i к нормальному (средневзвешенному) значению данного атрибута A_{icp} для исследуемого участка конструкции. Для выделения участков нарушенного контакта при обработке полученного материала следует использовать статистические критерии проверки на однородность.

– В случае малого различия A_i и A_{icp} надёжное определение участков с нарушенным контактом возможно после калибровки выбранной методики проведения

работ с применением численного моделирования или с помощью конструирования лабораторного макета обделки тоннеля.

– При интерпретации акустических сигналов, полученных импакт-методом, обычно используют показатель добротности Q (Q-фактор). Этот атрибут даёт приблизительную оценку, справедливую только для ярко выраженного резонанса, т. е. для колебательных систем с высокой степенью добротности. При работе импакт-методом возрастание добротности означает нарушение контактных условий «обделка-грунт».

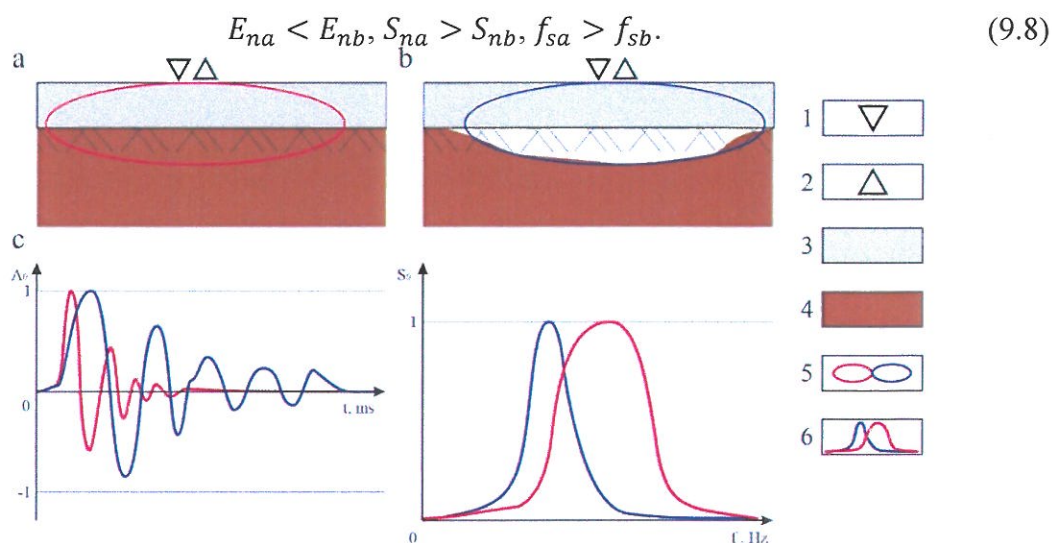
– При работе виброакустическим методом следует использовать атрибуты энергии нормированного сигнала, площади нормированного спектра и средневзвешенной частоты. Резкое возрастание энергии нормированного сигнала и одновременное уменьшение атрибутов средневзвешенной частоты и площади нормированного спектра свидетельствует о нарушенном контакте.

– Можно предложить следующие критерии контактных условий. Критерии определяются как соотношение значения атрибута E (энергия нормированного сигнала) и фонового (средневзвешенного) значения E_ϕ . Для оценки состояния контакта можно предложить использование «эмпирического критерия» (критерий трёх стандартных отклонений):

1. $E \leq E_\phi + StDev$ – плотный контакт;
2. $E_\phi + StDev < E \leq E_\phi + 2 \times StDev$ – частичный (ослабленный) контакт;
3. $E_\phi + 2 \times StDev < E$ – нарушенный контакт,

где $StDev$ – стандартное отклонение, рассчитанное на всей выборке измеренных значений атрибута «энергия нормированного сигнала».

– Помимо энергетического критерия, возможно использование критерия, опирающегося на соотношение трёх атрибутов нормированного отклика, вычисляемых с использованием формул (9.5 - 9.7). При нарушении контакта длительность акустического отклика увеличивается, следовательно, значение атрибута E_n возрастает. В соответствии с свойством преобразования Фурье, спектр отклика при этом становится уже, а центральная частота спектра – ниже. Поэтому атрибуты S_n и f_s снижаются с ростом E_n (рисунок 9.2):



1 – источник; 2 – приёмник; 3 – железобетон; 4 – вмещающий грунт; 5 – объём среды, вовлечённый в колебания; 6 – идеализированный отклик во временной и частотной областях

Рисунок 9.2 – Интерпретация поведения нормированного отклика: а – хороший контакт, б – плохой контакт

9.2 Георадиолокационное профилирование

9.2.1 Методика проведения работ

– Георадарное профилирование позволяет определить состояние арматуры, наличие дефектов в бетоне, обводнённых участков, оценить стояние контакта «обделка-грунт». Преимуществом георадарного метода является высокая производительность наблюдений. Обследование, как правило, ведётся из тоннеля по поверхности обделки.

– Метод заключается в передаче в объект контроля с помощью излучающей антенны электромагнитного импульса с последующей регистрацией откликов с помощью приёмной антенны. В каждой точке на профиле георадар излучает импульс и регистрирует в течение некоторого времени сигнал (трассу) с приёмной антенны. Множество трасс располагают друг за другом, их амплитудные значения кодируются цветом. Так формируются радарограммы отдельных профилей наблюдения.

– Георадиолокация позволяет получать более детальную картину вследствие более высокой разрешающей способности и относительно высокой скорости полевой работы. Распределение профилей наблюдения вкрест сечения тоннеля повторяет методику акустических обследований (см. рисунок 9.1, а).

9.2.2 Подготовка к проведению испытаний

– Натурные исследования производятся на заранее выбранных участках строящихся или эксплуатирующихся тоннелей метрополитена.

– Для обследования верхней части тоннелей необходимы передвижные леса или подъёмники.

– При использовании высокочастотных антенн, работающих в отрыве от поверхности, допускается измерение с движущегося средства.

9.2.3 Аппаратура

Для обследования обделок тоннелей можно использовать практически любые георадары с высокочастотными антенными блоками (800 МГц и более). Информация о глубинности георадиолокационного профилирования в зависимости от выбранного антенного блока представлена в п. 10.2.3 настоящего Руководства.

Примеры аппаратуры приведены в Приложении А.4.

9.2.4 Обработка данных

– Граф обработки данных георадиолокационного профилирования включает следующие процедуры:

- коррекция шкалы, длины профиля;
- задание параметров визуализации данных,
- задание параметров усиления (для получения записи, контрастной по всей длине);
- вычитание среднего (используется для удаления возможной синфазной помехи, а также сигнала прямого прохождения);
- полосовая фильтрация (улучшение соотношения сигнал-шум);
- дополнительные процедуры обработки сигналов: подавление прямой волны, подбор профиля усиления, преобразование Гильберта, различные виды фильтрации в

скользящих окнах (нерезкое маскирование, сглаживание средним), подбор цветовой схемы кодирования уровней амплитуд;

- при интерпретации данных допустимо использование атрибутного анализа волнового поля для выделения аномальных участков повышенной влажности, областей разуплотнения, пустот под бетонными покрытиями. Помимо перечисленных в п. 9.1.4 динамических атрибутов сигнала, для интерпретации данных георадиолокационного профилирования может быть использован атрибут взаимной корреляции ансамблей соседних трасс. Атрибуты определяются внутри заданного интервала Δt , привязанного к пропикированной отражающей границе, либо определяются в скользящем окне.

9.2.5 Интерпретация данных

- Задача интерпретации результатов георадиолокационного профилирования состоит в выявлении областей неплотного контакта между грунтом и обделкой.

- На радарограммах выделяется ось синфазности, которая соответствует границе между грунтом и обделкой.

- Характерными показателями неплотного контакта между грунтом и обделкой являются следующие особенности волнового поля:

- существенные изменения амплитуд волновых пакетов на оси синфазности, соответствующей контакту «обделка-грунт», указывающие на изменение коэффициента отражения;

- заметные изменения в волновой картине (например, появление хаотической волновой картины);

- появление в волновой картине так называемого «звона», начинающегося от границы «обделка-грунт», а также связанных с ним повышенных значений энергии после применения амплитудного преобразования Гильберта.

9.3 Возможности и ограничения методов

- Результатом совместной интерпретации георадиолокационного профилирования и акустической съёмки являются карты распределения различных динамических атрибутов сигнала с выделенными участками потенциального нарушения контакта «обделка-грунт».

- Основным недостатком рассмотренных методов является отсутствие регламентированных критериев определения нарушенного состояния контактных условий и видов возможных нарушений контакта на данный момент.

- Использование акустического метода без учёта априорной информации и георадиолокационного профилирования не позволяет сделать выводы о физической природе происхождения выделенных зон аномального значения атрибутов.

- Для успешного применения рассматриваемой методики обработки и интерпретации данных виброакустического метода требуется дальнейшее развитие двух направлений исследований:

- изучение влияния акустических волн-помех, обусловленных пространственными и материальными особенностями изучаемой конструкции;

- определение числа видов состояния контакта и выработка количественных критериев для их разделения.

– Традиционно в российской практике для оценки состояния контакта используются три его вида: плотный контакт, ослабленный контакт, нарушенный контакт. «Эмпирический критерий» (критерий 3σ) может быть адаптирован для указанной классификации для атрибута энергии нормированного сигнала E_n следующим образом:

1. $E_n \leq E_{nm} + \sigma$ – плотный контакт;
2. $E_{nm} + \sigma < E_n \leq E_{nm} + 2\sigma$ – частичный / ослабленный контакт;
3. $E_{nm} + 2\sigma < E_n$ – нарушенный контакт,

где σ – стандартное отклонение, рассчитанное на всей выборке измеренных значений атрибута; E_{nm} – медианное значение атрибута по выборке.

– Помимо «эмпирического критерия», для основного из характерных параметров второй предлагаемый путь состоит в совместном анализе поведения комплекта атрибутов и выработки синтетических параметров, характеризующих колебательную систему «плита-грунт».

10. Провалы и разуплотнения грунтового массива при щитовой проходке

10.1 Наземная сейсморазведка

– Цель сейсморазведочных работ состоит в проведении исследований для оценки состояния грунтового массива с прогнозом зон возможных просадок.

– Для достижения указанной цели используется наземная сейсморазведка с применением метода первых вступлений (МПВ), метода отражённых волн в модификации общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) на двух типах волн (продольных и поперечных) и метода многоканального анализа поверхностных волн (MASW).

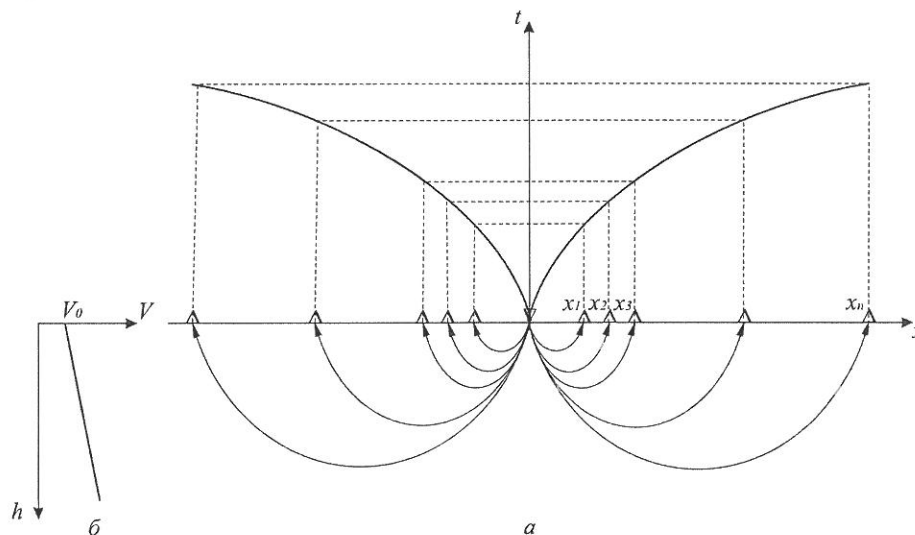
– Виды и объёмы сейсморазведочных работ составляются в соответствии с Техническим заданием, Программой работ и требованиями СП 47.13330.2016, СП 11-105-97 часть 6, РСН-66-87 и других действующих нормативных актов.

10.1.1 Методика проведения работ

10.1.1.1 Метод первых вступлений

– В основе МРВ чаще всего используется двумерно-неоднородная модель среды с переменной скоростью распространения волн, целевыми направленными волнами являются рефрагированные волны с криволинейными траекториями.

– Задача состоит в выделении на зарегистрированных кривой сейсмоприёмников данных годографа рефрагированных волн. Лучевая схема распространения волн для такой модели среды представлена на рисунке. 10.1. Пример полевых данных с выделенным годографом приведён на рисунке 10.2.



В верхней полуплоскости изображён годограф рефрагированных волн (а); б – изменение скорости распространения волн с глубиной

Рисунок 10.1 – Лучевая схема: источник колебаний у основания оси времени, приёмники колебаний x_i

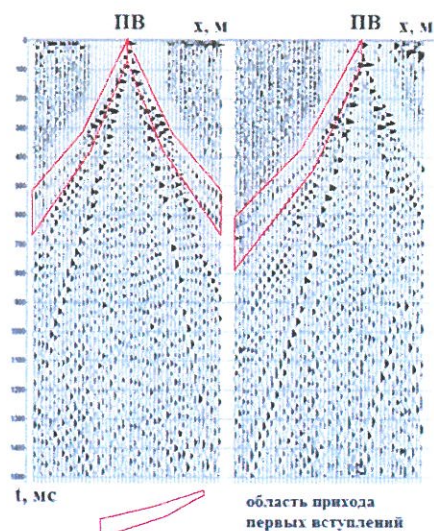


Рисунок 10.2 – Пример полевых сейсмограмм с выделенными первыми вступлениями

10.1.1.2 Метод отражённых волн МОВ-ОГТ

– Метод отражённых волн (МОВ) основан на выделении на зарегистрированных сигналах отражений от границ раздела между слоями с различной акустической жёсткостью. По годографу отражённой волны от плоской границы раздела двух сред можно восстановить положение границы в разрезе и среднюю скорость распространения волн в покрывающей среде (рисунок 10.3).

– Для многослойного разреза с различными скоростными свойствами отдельных слоёв и неплоскими контрастными границами применяется модификация метода, использующая многократные перекрытия. Это метод общей глубинной точки (МОВ-ОГТ, см. рисунок 10.3). Посредством организации систем наблюдения – последовательности и координат расположения источников и приёмников на профиле – «общие глубинные точки» отражения располагаются по поверхностям всех отражающих границ в разрезе более или менее равномерно. В результате происходит накопление отражённых сигналов, оси синфазности на разрезах ОГТ проявляются с большим соотношением «сигнал/шум», и появляется возможность последовательно вычислить скорости распространения волн в слоях.

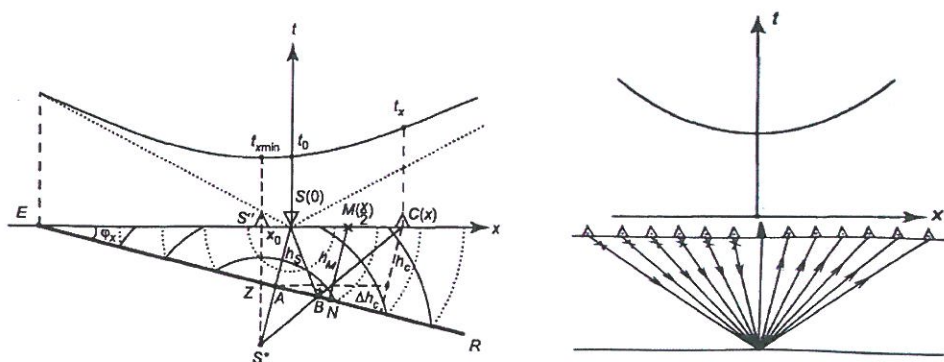


Рисунок 10.3 – Лучевая схема распространения отражённой волны и годограф для центральной расстановки (слева) и лучевая схема для общей глубинной точки (справа)

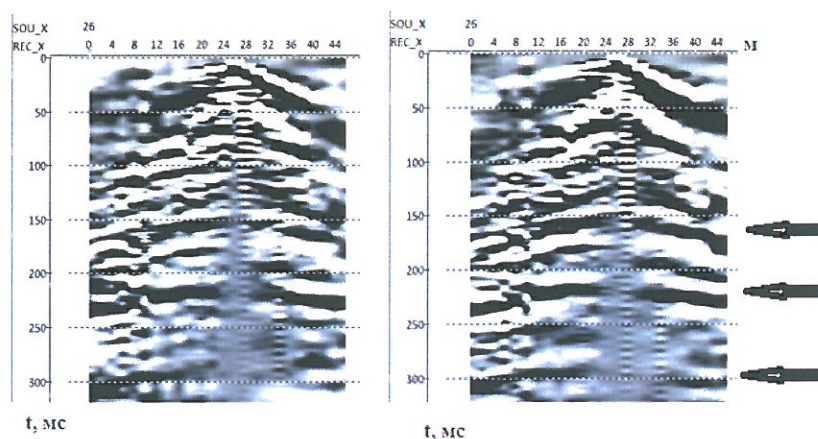


Рисунок 10.4 – Пример сейсмограмм ОПВ с выделенным годографом отражённой волны

10.1.1.3 Метод поверхностных волн

– Метод поверхностных волн (MASW) – метод анализа спектральных компонент волн. Целевые направленные волны данного метода – волны Рэлея (англ. Rayleigh waves) – относятся к поверхностным волнам, распространяющимся вдоль границы «земля – воздух». Колебания частиц грунта при прохождении этих волн осуществляются по эллиптическим траекториям в вертикальной плоскости, проходящей через направление распространения волны, и содержат информацию не только о продольных, но и о сдвиговых смещениях грунта (рисунок 10.5).

– Обе компоненты смещения быстро затухают с глубиной: 95% энергии волны Рэлея сосредоточены в слое мощностью $h_{эфф} = 0,6 \cdot (1 + \sigma) \cdot \lambda_R$, где σ – коэффициент Пуассона, λ_R – длина волны Рэлея. Для большинства грунтов коэффициент Пуассона принимает значения от 0,2 до 0,5. Коэффициент Пуассона также можно выразить через скорости волн продольных V_p и поперечных V_s :

$$\sigma = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (10.1)$$

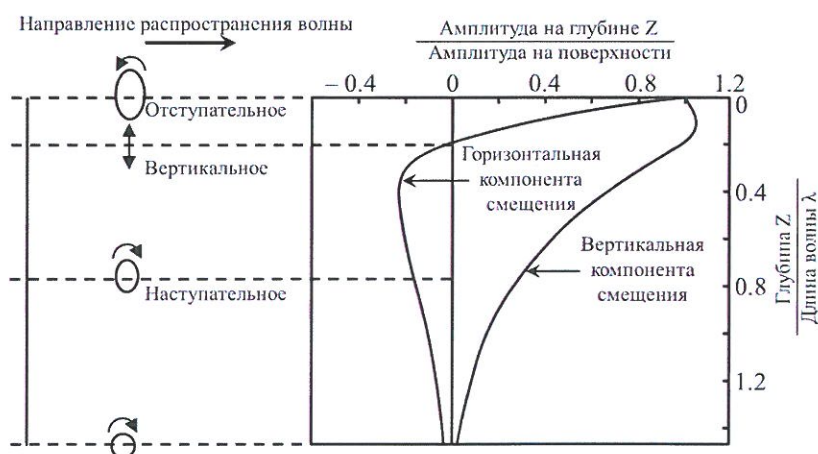


Рисунок 10.5 – Схематическое изображение траекторий движения частиц среды на разных глубинах при прохождении волны Рэлея

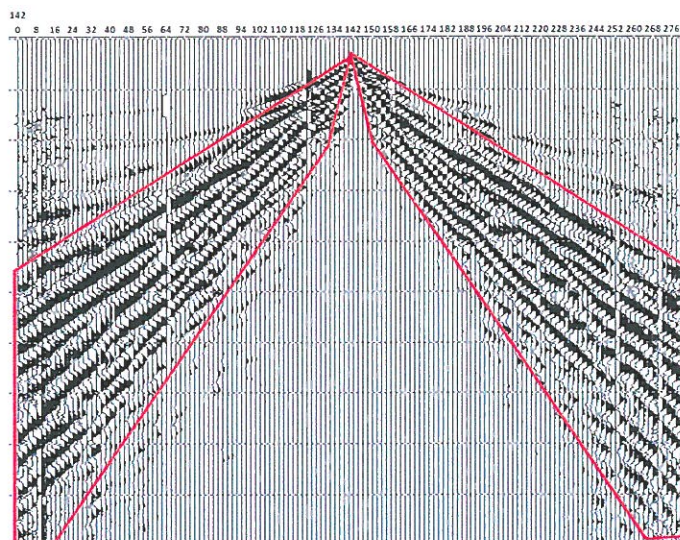


Рисунок 10.6 – Пример сейсмограммы с выделенным цугом поверхностных волн

– Волна Рэля существует в приповерхностном слое мощностью порядка длины волны; скорость волны определяется свойствами пород в этом слое. Низкочастотные волны (с большей длиной волны) проникают глубже, чем высокочастотные. Следовательно, они несут информацию о более глубоких горизонтах. Самые высокочастотные колебания с маленькой длиной волны несут информацию о приповерхностном слое малой мощности, а низкочастотные – о слоях, залегающих на больших глубинах. Если скорость, как это часто бывает, возрастает с глубиной, то низкочастотные составляющие колебаний будут обгонять высокочастотные.

– Для визуального представления информации о скоростях поверхностных волн используют дисперсионные кривые – графики, показывающие зависимость скоростей волн Рэля от частоты $V_R(f)$ (рисунок 10.7).

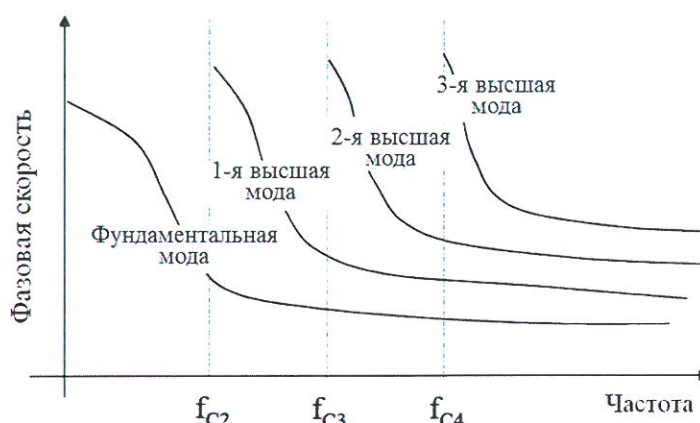


Рисунок 10.7 – В вертикально-неоднородной среде существуют несколько мод рэлеевских волн. В методе поверхностных волн применяется только фундаментальная мода

– Вид дисперсионной кривой зависит от *трёх параметров* среды: скоростей поперечных и продольных волн и плотности (V_S , V_P , ρ). Наибольшее влияние оказывают скорости V_S (следовательно, метод поверхностных волн к ним наиболее чувствителен). Зная распределение этих трёх параметров по глубине $\{V_S(Z), V_P(Z), \rho(Z)\}$, можно однозначно рассчитать зависимость $V_R(f)$ для такой среды – получить дисперсионную кривую.

– Методы решения геологических задач с использованием поверхностных волн основаны на явлении частотной дисперсии. На этапе получения данных регистрируются рэлеевские волны в максимально широком диапазоне частот, насколько это позволяют аппаратура и методика измерений. В процессе обработки из этих данных извлекается информация о дисперсии рэлеевских волн, которая подвергается процедуре инверсии с целью получения требуемых параметров разреза (V_s). По итогам инверсии определяются мощности слоёв и скорости распространения поперечных волн в них. Глубинность определяется наименьшей зарегистрированной частотой и в инженерно-геофизических задачах обычно составляет не более 20-30 м.

– Особенностью метода является восстановление разреза поперечных волн с использованием только приёмников с вертикальной осью чувствительности. По глубинности исследований метод MASW обычно уступает МПВ и значительно проигрывает МОВ, но намного более чувствителен к скоростным вариациям в верхней части разреза. Другими преимуществами являются высокая производительность полевых работ и относительная простота обработки данных.

10.1.1.4 Возбуждение колебаний

– Основным источником возбуждения упругих колебаний является ударный источник – ручной тампер (строительный молот, кувалда). Реже используются механические источники типа «падающий груз».

– Способ возбуждения колебаний должен обеспечить получение чётких записей полезных волн. Продолжительность и интенсивность сейсмической записи должны обеспечить уверенное выделение регистрируемых типов волн. Для определения оптимальных условий возбуждения и приёма других колебаний проводятся опытные методические работы.

– Применение ручного тампера (кувалды) весом 5-10 кг целесообразно в наиболее простых инженерно-геологических условиях при глубине исследования до 20-30 м. На рыхлых и слабосцементированных грунтах необходимо использовать деревянные или металлические подставки с площадью, превышающей площадь ударной части тампера не менее чем в 2 раза.

– Для увеличения глубины исследования (до 50-100 м) необходимо применять специализированные источники, буксируемые на автомобиле или транспортном средстве повышенной проходимости.

– Продольные упругие волны возбуждаются вертикально направленным ударом по металлической платформе; поперечные – горизонтально направленным ударом. В зависимости от решаемых задач, условий возбуждения и приёма упругих колебаний горизонтальный удар наносится либо по вертикальной стенке горной выработки (шурф, закопушка) глубиной 0,3-0,5 м, либо по специальному устройству, установленному на поверхности грунта и обеспечивающему передачу грунту сдвигового импульса.

10.1.1.5 Приём и регистрация колебаний

– Сейсмоприёмники (СП) должны иметь хороший контакт с грунтом. На участках с сухим грунтом СП утапливают в грунт или устанавливают в ямки, глубина которых больше высоты корпуса СП.

– При установке СП на твёрдом (скальном) грунте, асфальте или бетоне применяют навинчиваемые диски, пластины с тремя точками опоры или другие приспособления. Допускается установка СП без штырей, при этом СП прижимают к поверхности твёрдого основания мешочками с песком.

- При работе в зимних условиях на рыхлом грунте СП вмораживают в лунки.
- При наличии помех (звуковых и ветровых) каждый СП помещают в бурку глубиной до 0,2-0,3 м с последующей присыпкой рыхлым грунтом (снегом). Отводы для подключения СП также присыпают.
- При установке СП на профиле ось его максимальной чувствительности от заданного направления не должна превышать 15°.
- При подключении СП к сейсмическим косам следует обратить внимание на чистоту подключаемых разъёмов: они должны быть свободны от грязи, в сухом состоянии, не иметь следов коррозии.
- При установке СП на профиле около каждого прибора необходимо удалить растительность, которая может его касаться. Кабель сейсмической косы отодвигают в сторону от прибора.
- Отметка момента возбуждения сигнала в инженерной сейсморазведке осуществляется главным образом либо «по обнаружению», либо «по замыканию».
- При отметке момента возбуждения «по обнаружению» используется сигнал, поступающий с СП, пьезодатчика или микрофона, установленного рядом с пунктом возбуждения.
- Отметка момента возбуждения «по замыканию» осуществляется замыканием при ударе электроцепи кувалда – платформа, по которой наносится удар или используется контактный прерыватель, закреплённый на тампере (кувалде).

– **10.1.1.6 Системы наблюдений**

- Системой наблюдений (СН) называют взаимное расположение пунктов возбуждения (ПВ) и пунктов приёма (ПП) колебаний. Она образуется при последовательном перемещении базы наблюдений, которая состоит из сейсмической расстановки и сейсмических источников. Сейсмическая расстановка (приёмная линия) – это совокупность всех пунктов (точек) приёма, в которых одновременно проводится регистрация колебаний от единого источника.
- Системы наблюдений используемых методов (МПВ, МОВ-ОГТ, MASW) должны обеспечивать при оптимальных условиях прослеживание всех полезных направленных волн.
- В инженерной сейсморазведке нашли наибольшее применение следующие модификации:
 - А. Одиночные сейсмозондирования с получением разобщённых одиночных годографов;
 - Б. Одиночные сейсмозондирования с получением в пункте наблюдений двух противоположно направленных ветвей годографов;
 - В. Одиночные сейсмозондирования с получением пар встречных годографов;
 - Г. Непрерывное профилирование по системе встречно-нагоняющих годографов.
- Наблюдения по системе А позволяют изучать геологический разрез на отдельных участках разведочного профиля. Следует применять при рекогносцировочных исследованиях с горизонтальным залеганием преломляющих границ (углы наклона менее 5°) и плавном изменении граничных скоростей в горизонтальном направлении. Расстояние между пунктами наблюдений больше длины каждой из ветвей годографа.

– Наблюдения по системе Б используются при наклонном залегании преломляющих границ и, при необходимости, большей точности и детальности наблюдений.

– Наблюдения по системе В применяются на участках детальных работ для повышения точности увязки годографов во взаимных точках при наличии в разрезе криволинейных границ.

– Система наблюдений Г является наиболее универсальной и применяется для детальных исследований.

– Сейсмические наблюдения, как правило, должны проводиться с равными расстояниями (Δx) между ПП, обеспечивающими надёжную фазовую корреляцию полезных волн. Корреляция волн осуществляется по совокупности динамических и кинематических признаков:

– повторяемость формы записи от трассы к трассе;

– плавное изменение амплитуды коррелируемой волны по мере удаления от источника;

– плавное изменение кажущейся скорости.

– Для обеспечения надёжной фазовой корреляции полезных волн на сейсмограмме шаг Δx между пунктами приёма определяется следующим соотношением: $\Delta x < V^* \frac{T_B}{2}$, где V^* – кажущаяся скорость полезной волны, T_B – её видимый период.

– При работах на песчано-глинистых грунтах шаг Δx между ПП следует брать равным 2-5 м. При картировании мелкозалегających границ (глубина до 5 м) или изучении поверхностных волн допускается уменьшение Δx до 1 м.

– При картировочных работах шаг ПП определяется требуемой детальностью разреза – минимальным линейным размером картируемого объекта – предполагаемого провала или особенности на границе: шаг между ПП должен быть, по крайней мере, в 5 раз меньше, чем их линейный размер. Для картирования преломляющих границ в МПВ при регистрации в первых вступлениях головных волн шаг ПВ не должен превышать интервал прослеживаемости целевой головной волны на сейсмограммах.

– При работах методом МПВ-СТ шаг ПВ определяет детальность получаемого разреза и равен 1–3 расстояниям Δx между ПП.

– При работах по методике МОВ-ОГТ шаг ПП и ПВ определяет детальность получаемого разреза. Шаг между ОГТ определяется по формуле: $\Delta x_{\text{ОГТ}} = \frac{1}{2} |x_{\text{ПП}} - x_{\text{ПВ}}|$. Шаг ПВ должен быть равен шагу ПП.

– Глубинность исследований зависит от длины годографа целевой волны:

– глубинность методов преломлённых волн составляет $1/3$ – $1/10$ от длины годографа первых вступлений;

– глубинность методов отражённых волн составляет 1–1,5 от длины годографа отражённой волны от целевой границы;

– глубинность метода МПВ определяется минимальной зарегистрированной частотой и, как следствие, длиной расстановки. Поскольку частотный состав записи определяется, в частности, собственной частотой СП и мощностью источника возбуждения,

то для работ методом МПВ целесообразно использовать низкочастотные СП и источники весом около 10 кг.

– Для картирования преломляющих границ в МПВ при регистрации в первых вступлениях головных волн число выносных ПВ равно числу изломов на годографе первых вступлений. Расстояние выноса ПВ определяется размером «мёртвой зоны» соответствующей целевой головной волны на сейсмограммах.

– При работах методами МПВ глубинность исследований может быть увеличена посредством выполнения выносных ПВ и последующим достраиванием годографов для двух положений приёмных линий. При этом расстояние выноса определяется возможностью уверенной фазовой корреляции преломлённых волн на всех диапазонах удалений.

– При работах методом МОВ-ОГТ выносные ПВ используют для увеличения кратности перекрытий на крайних каналах. Шаг выносных ПВ должен быть равен шагу ПП в пределах приёмной линии. Число выносных ПВ слева и справа от расстановки не может быть больше числа ПП в пределах приёмной линии.

– Расстояние выносного ПВ в методе МПВ составляет от 5 до 15 м и определяется требуемой глубинностью. Работы проводятся с использованием фланговой расстановки.

– Выбор типа регистрируемых волн (продольные или поперечные) должен определяться поставленной задачей. При выборе типа волн следует руководствоваться наибольшим контрастом скорости распространения продольных и поперечных волн в исследуемой среде.

– При задачах, предполагающих оценку несущей способности грунтов, необходимо проводить сейсморазведочные работы с использованием двух типов волн – поперечные и продольные. При работах методом МОВ-ОГТ при исследовании глубин до 50-100 м целесообразно использовать центральную Y-Y расстановку.

– При работах методом МОВ-ОГТ при исследовании глубин больше 100 м целесообразно использовать фланговую Z-Z расстановку.

– Число повторных ударов – накоплений сигнала на одном ПВ определяется требуемым соотношением S/N , где S – амплитуда полезного сигнала, N – амплитуда случайной помехи. При этом соотношение S/N с числом накоплений n увеличивается в \sqrt{n} раз.

– Длина записи на сейсмограммах должна быть по крайней мере в 2 раза больше времени регистрации целевой волны на крайних каналах сейсмической расстановки.

– При выборе шага квантования сигнала следует руководствоваться формулой, связывающей шаг квантования dt и максимальную частоту в амплитудном спектре сигнала f_{\max} : $dt=1/(5f_{\max})$.

– При постановке работ по методу MASW наиболее широко применяется методика «профилирования». Приёмники располагаются линией вдоль профиля, а источник находится на «выносе», т. е. на некотором расстоянии от косы. Для улучшения соотношения между амплитудами полезного сигнала и помех осуществляется накопление сигнала – повторные возбуждения, которые затем суммируются между собой. Уместно отметить, что ввиду высокой амплитуды целевых волн не требуется много реализаций – опыт показывает, что в большинстве случаев достаточно 4 накоплений, а иногда можно работать вообще без повторных возбуждений.

– После возбуждения на данном пункте вся расстановка перемещается вдоль профиля на некоторое фиксированное расстояние. Таким образом, получение полевых данных методом MASW принципиально не отличается от работы с фланговой расстановкой методом ОГТ.

– Основные геометрические параметры расстановки выбирают исходя из поставленной задачи так, чтобы обеспечить требуемую глубинность и разрешённость разреза по вертикали и горизонтали. Существует несколько эмпирических зависимостей между параметрами расстановки и характеристиками получаемого разреза. Зная эти зависимости, можно задать оптимальные параметры методики наблюдений: длину приёмной расстановки, число каналов и шаг между приёмниками, расстояние от источника до ближайшего приёмника.

– *Длина приёмной расстановки L* влияет на глубинность исследований (Z_{\max}). Строго вычислить эту связь не представляется возможным, но результаты многочисленных работ показали, что L определяет максимальную длину волны, которую можно уверенно зарегистрировать, а она, в свою очередь, связана с глубиной изучения. В итоге $Z_{\max} \approx L/2$, что и принимается на сегодняшний день за ориентировочный критерий глубинности метода MASW. При этом важно помнить, что в первую очередь глубинность определяется не длиной расстановки, а частотным составом записи. Следовательно, если приёмники не способны зарегистрировать достаточно низкие частоты, увеличивать базу приёма бессмысленно.

– Кроме того, следует помнить, что увеличивать базу приёма в погоне за глубинностью не всегда выгодно ещё по одной причине. Дело в том, что при наличии сильной латеральной изменчивости разреза большая длина расстановки ухудшает разрешающую способность метода по горизонтали. Кроме того, на дальних каналах ухудшается соотношение сигнал/шум и сказывается затухание высоких частот.

– *Шаг между приёмниками Δx* связан с вертикальной разрешающей способностью: в среднем чем меньше шаг пунктов приёма, тем более тонкие приповерхностные слои «чувствует» метод. Наименьшая мощность слоя, который может быть выделен по результатам работы методом MASW, примерно равна шагу между пунктами приёма: $h_{\min} \approx \Delta x$. Отметим, что эта зависимость исключительно эмпирическая и строго не соблюдается. Всё зависит от конкретной геологической ситуации. Обычно используют шаг 0,5, 1 или 2 м.

– Влияние *удаления источника X_1* на конечный результат не очевидно и до конца не изучено. Вообще, источник следует удалять от приёмников на некоторое расстояние из-за того, что вблизи пункта возбуждения наблюдаются сложные нелинейные эффекты, и их стараются избежать, регистрируя стабильную волновую картину, начиная с некоторого удаления. Разные авторы рекомендуют выбирать вынос источника X_1 около 5-10 м, (2-10) Δx или 20-30% от длины приёмной расстановки. В большинстве случаев выбор выноса не оказывает сильное влияние на результат.

10.1.2 Подготовка к проведению испытаний

– После обозначения области сейсморазведочных исследований выполняют разбивку профилей. Если область исследований имеет изометричную форму, то сеть профилей располагается с интервалами между ними, равными 1 см в масштабе отчётной карты. Если область исследований на плане имеет вытянутую форму, то в зависимости от линейных размеров и рекомендаций по длине профилей (см. выше) предпочтительно проложить 1-2 продольных профиля и серию поперечных профилей. При работе в городских условиях число, длины и расположение профилей определяют в соответствии с конкретной застройкой.

– После привязки начал и концов профилей к карте организуют пункты возбуждения. При расположении ПВ на грунте без покрытия, используются стальная подкладка и стальные штыри. При работе на асфальтовом покрытии необходимо иметь в виду частичное его разрушение. При организации точек расположения сейсмоприёмников выбирают способ создания надёжного контакта электродинамической системы с грунтом.

– При работе в городских условиях необходимо избегать проведения работ в периоды суток с максимальной механической шумовой нагрузкой – это рабочий день, интервал времени действия метро и т. д. Серьёзную помеху сейсморазведочным работам может оказать собственно проходка тоннеля вблизи сейсморазведочных профилей.

10.1.3 Аппаратура

– Для проведения полевых сейсморазведочных работ необходимо использовать сейсморазведочные станции, параметры которых соответствуют техническим требованиям и поставленным задачам.

– Источники возбуждения и приёмники упругих колебаний (сейсмоприёмники) должны рассматриваться в качестве составной части сейсморазведочной аппаратуры, а их технические характеристики должны быть согласованы с основной аппаратурой.

– В настоящее время в инженерной сейсморазведке применяют сейсморазведочные станции (Приложение А), условно подразделяемые по числу каналов записи на три типа: линейные 24-канальные (примеры сеймостанций: «Лакколит 24 – М4», «SGD-SEL»); линейные 48-канальные (примеры сеймостанций: «ЭЛЛИСС-3», «SGD-SEL»); телеметрические с числом каналов больше 48 (примеры сеймостанций: «ТЕЛСС-403», «SGD-SET»).

– Характеристики сеймостанций не должны выходить за пределы, установленные паспортными данными и инструкциями по эксплуатации.

– В ходе проведения полевых работ должны систематически выполняться контрольно-поверочные работы: ежедневная поверка амплитудной и фазовой идентичностей сейсмического канала без сейсмоприёмников; аналогичная поверка сейсмического канала с комплектом сейсмоприёмников (один раз в декаду); ежемесячная проверка уровня шумов сейсмических каналов, уровня взаимных влияний между каналами, коэффициента нелинейных искажений.

– Значения параметров аппаратуры, контролируемых в процессе выполнения полевых работ, не должны превышать следующие значения: фазовая неидентичность каналов без сейсмоприёмников – не более 5% от видимого периода записи; с сейсмоприёмниками – не более 10%; амплитудная неидентичность – не более 5 дБ; амплитуда собственных шумов и наводок усилителей при максимальном усилении не должна превышать на сейсмограмме 3-5 мм; взаимные влияния всех каналов на один – не более 35 дБ; предельный коэффициент нелинейных искажений – не более 0,001%.

– Датчик, фиксирующий момент нанесения удара, должен обеспечивать точность отсчёта времени с погрешностью не более $\pm 2\delta t$ (δt – точность снимаемых отсчётов).

– В качестве приёмников упругих колебаний в инженерной сейсморазведке, в основном, используются сейсмоприёмники (СП) электродинамического типа (Приложение Б). СП считаются работоспособными, если они удовлетворяют следующим требованиям: периоды собственных колебаний отличаются не более чем на +5%; чувствительность в комплекте отличается не более чем на 25%; отношение амплитуд записи собственного

процесса для СП одного комплекта должно выдерживаться с точностью +15%. Отводы для подключения СП должны быть от 0,5 до 2,5 м.

– Подключение СП к сеймостанции выполняется с помощью аналоговых (линейные сейсмические станции) или цифровых (телеметрические сейсмические станции) сейсмических кос. Расстояние между разъёмами для подключения СП при малоглубинных исследованиях должны быть от 1 до 5 м.

10.1.4 Обработка данных

– Первичная обработка результатов сейсмических наблюдений может проводиться с помощью любого геофизического ПО, предназначенного для обработки данных МПВ и МОВ-ОГТ. Наиболее распространённой отечественной системой является RadExPro, разработанная геофизической компанией «Десо-Геофизика».

– Предварительная обработка данных по методам МПВ с использованием томографической обработки и МОВ-ОГТ включает в себя:

- предварительную редакцию трасс на сейсмограммах ОПВ;
- ввод геометрии расстановки в исходные данные;
- суммирование реализаций с одного пункта возбуждения с целью подавления случайной помехи, вычитание разнонаправленных записей для сейсмограмм, записанных по схеме Y-Y (рисунок 10.8);
- ввод статических поправок, связанных с погрешностью отсчёта момента запуска станции.

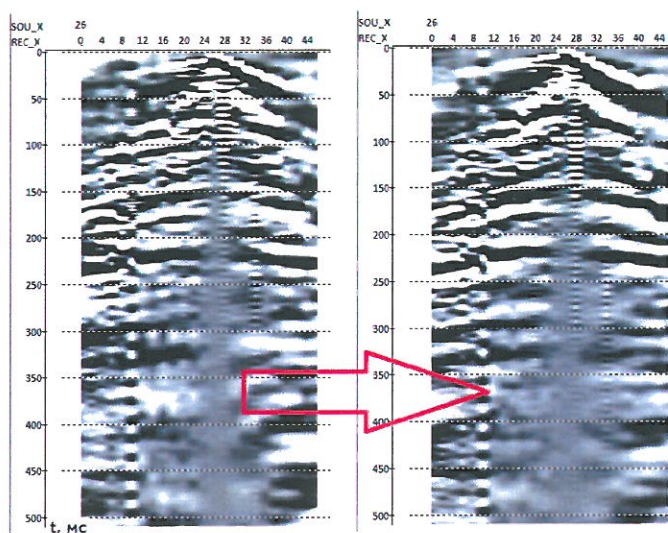


Рисунок 10.8 – Пример суммирования и вычитания разнонаправленных ударов

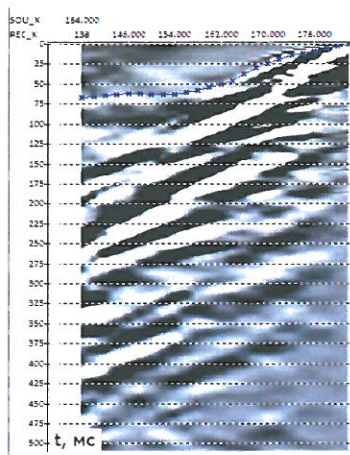


Рисунок 10.9 – Пример сейсмограммы с пропикированными первыми вступлениями, записанной по схеме наблюдений У-У

- Обработка данных МПВ методом сейсмотомографии
- На следующем этапе обработки проводилось пикирование первых вступлений. На рисунке 10.9 приведён пример волновой картины с пикировками первых вступлений.
- Полученные пикировки экспортируются для дальнейшей обработки в специализированном ПО для томографической инверсии данных.
- При решении прямой томографической задачи трассировки лучей используется специальный алгоритм теории графов (shortest path's method). Этот алгоритм характеризуется высокой скоростью расчётов и контролируемой точностью. При моделировании поля времён среда разбивается сетью прямоугольных ячеек с постоянным значением скорости. Для решения обратной задачи (инверсии) используется метод Ньютона с регуляризацией. Регуляризация повышает устойчивость решения и позволяет получить более гладкое распределение скоростей в среде.
- Итоговый разрез представляет собой распределение поля скоростей в двумерной плоскости.
- Обработка сейсморазведочных данных методом МОВ ОГТ
- Первый из двух этапов обработки – получение предварительного временного разреза, что включает в себя анализ волнового поля с целью определения амплитудно-частотного спектра записи, выявление волн-помех и т. д.; подбор параметров полосовой и $f-k$ фильтрации, применяемых к исходным записям с целью подавления волн-помех; подбор параметров амплитудной коррекции; выбор скоростного закона и ввод его в базу данных; подбор параметров мьютинга (рисунок 10.10); суммирование по ОГТ.
- На заключительном этапе проводится:
 - коррекция кинематических и статических поправок;
 - подавление волн-помех по кажущимся скоростям;
 - коррекция параметров деконволюции и фильтрации;
 - уточнение параметров мьютинга;
 - получение окончательного временного разреза с применением различных процедур обработки, улучшающих соотношение сигнал/помеха (рисунок 10.11);
 - преобразование временного разреза в глубинный.

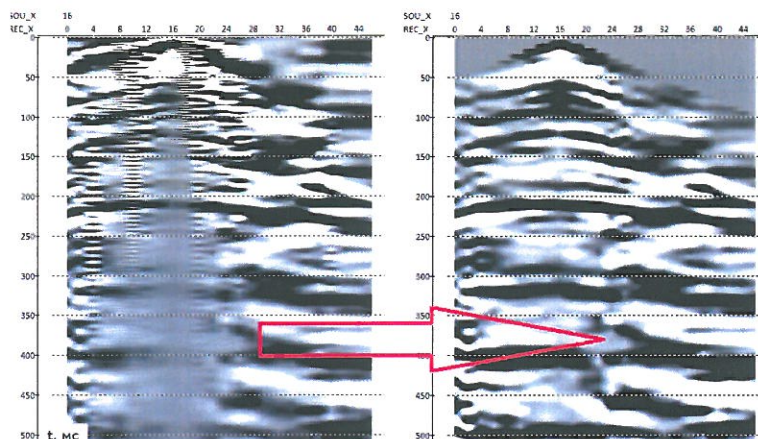


Рисунок 10.10 – Пример результата первого этапа обработки: фильтрации, амплитудной коррекции данных и верхнего мьютинга

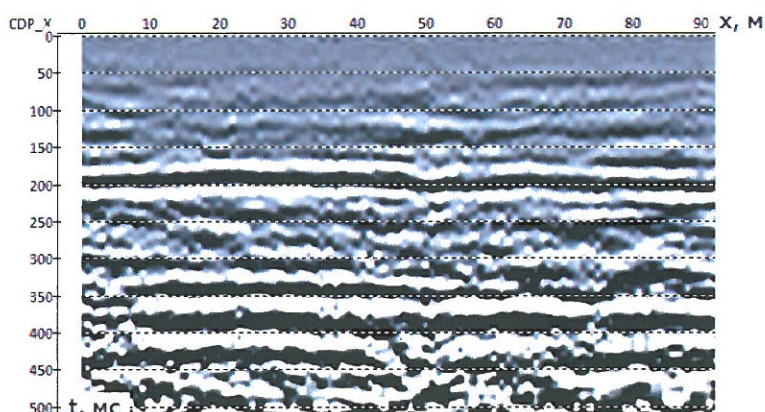


Рисунок 10.11 – Пример полученного по результатам второго этапа обработки временного разреза ОГТ

- Обработка полевых материалов MASW включает в себя:
- монтаж сейсмограммы из отдельных сейсмотрасс, их группировку и сортировку, суммирование накоплений;
- мьютинг – обнуление сейсмотрасс на тех временах, когда регистрируются нецелевые (поверхностные) волны;
- построение дисперсионных изображений: полученные таким образом дисперсионные кривые отражают строение среды в одномерном приближении – распределение по глубине V_S , V_P , ρ ;
- дисперсионное изображение представляет собой двумерный спектр, рассчитанный по сейсмограмме: данные об амплитудах переводятся из области «время – расстояние» (t, x) в область «частота – скорость» (f, V). График этой функции-суммы, построенный в осях (f, V_R), и будет дисперсионным изображением.
- Дисперсионное изображение рассчитывается и строится для каждой сейсмограммы ОПВ. По максимумам на дисперсионных изображениях можно проследить («пропикировать») дисперсионные кривые для одной или нескольких мод поверхностных волн (рисунок 10.12).

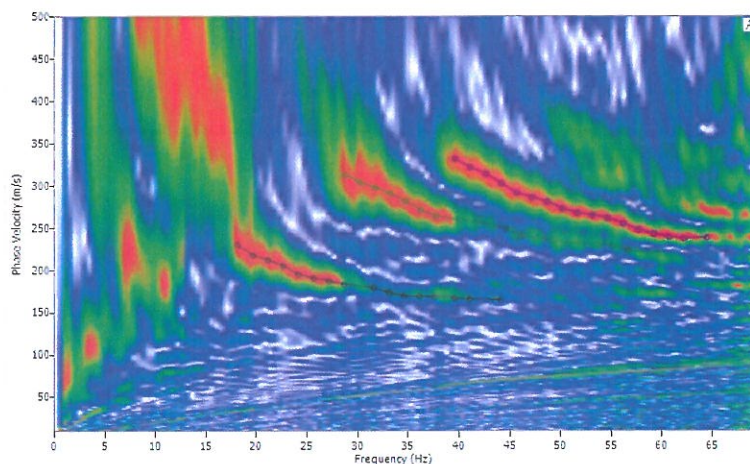


Рисунок 10.12 – Пример дисперсионного изображения с выделенными дисперсионными кривыми для фундаментальной и двух высших мод

10.1.5 Интерпретация данных

– Для выделения ослабленных зон в четвертичных и юрских отложениях используются два основных подхода к интерпретации результатов сейсморазведки: анализ динамических и анализ кинематических параметров полученных временных или скоростных разрезов.

– В случае использования динамической оценки на сейсмических записях оцениваются динамические характеристики преломлённых и отражённых волн: затухание, прослеживаемость формы сигнала, наличие высокоамплитудных отражений и т. д.

– В случае наличия ярко выраженного затухания сигнала и/или резкого изменения формы и частотной составляющей сигнала делается вывод о наличии в разрезе возможной зоны разуплотнения.

– В случае использования кинематической оценки анализу подвергаются годографы первых вступлений и скоростные разрезы. Если на скоростных разрезах присутствуют участки резкого изменения скоростей по горизонтали в рамках одного и того же слоя, то делается вывод о наличии ослабленной зоны.

– Интерпретация данных MASW представляет собой обращение (инверсию) результата обработки – дисперсионных кривых в сейсмогеологический разрез поперечных волн, и состоит из набора последовательных операций:

- выбор числа и мощностей слоёв;
- выбор начальной модели;
- итеративный подбор решения.

– Для каждой из сейсмограмм ОПВ в результате инверсии восстанавливается одномерный разрез $V_S(z)$. Получаемый 1D-разрез относят к середине приёмной расстановки (рисунок 10.13).

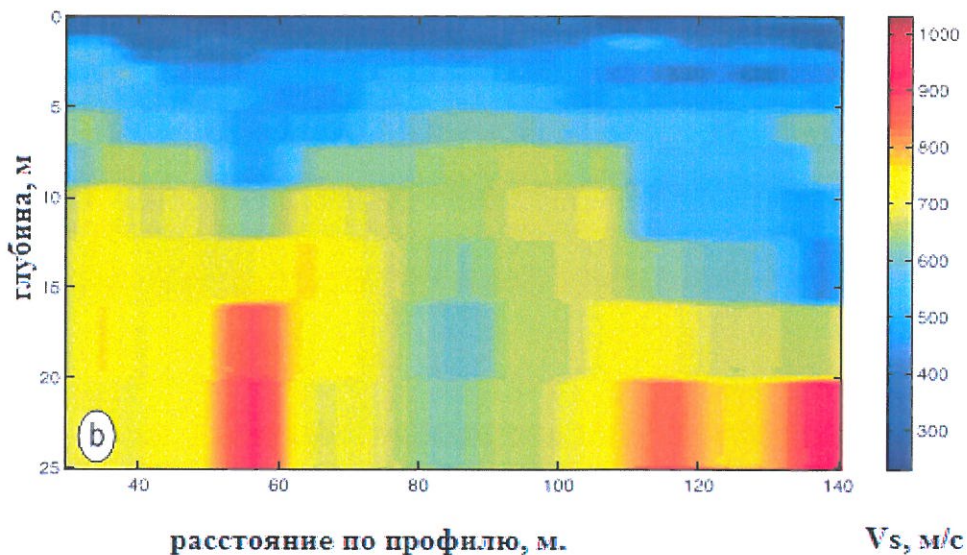


Рисунок 10.13 – Пример восстановленной модели разреза в значениях скорости поперечных волн V_s по результатам MASW

10.2 Георадиолокационное профилирование

10.2.1 Методика проведения работ

– Цель георадиолокационных работ состоит в проведении исследований для оценки состояния грунтового массива с прогнозом зон возможных просадок. Конкретные варианты георадиолокации (георадарного профилирования, ground penetration radar survey, GPR) и объёмы геофизических работ определяются в соответствии с Техническим заданием, Программой работ и требованиями нормативных документов СП 47.13330.2016, СП 11-105-97 и других действующих нормативных актов.

– Принцип действия аппаратуры для подповерхностного радиолокационного зондирования (георадара) основан на излучении сверхширокополосных (наносекундных) импульсов метрового и дециметрового диапазонов электромагнитных волн и приёме сигналов, отражённых от границ раздела слоёв зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства. Такими границами раздела в исследуемых средах являются контакт между сухими и влагонасыщенными грунтами – уровень грунтовых вод; контакты между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между мёрзлыми и тальми грунтами и т.д.

– Частотный диапазон георадиолокации обусловлен необходимостью минимизировать вариации скорости распространения электромагнитной волны в зависимости от частоты и составляет 10 МГц – 3 ГГц.

– Полезным сигналом в георадиолокации в большинстве случаев является сигнал, отражённый от границы слоёв с разными электрофизическими свойствами. Помимо прослеживаемых отражённых границ анализируются регистрируемые на записях дифрагированные волны, даются предположения о природе источников дифракции электромагнитных волн (рисунок 10.14).

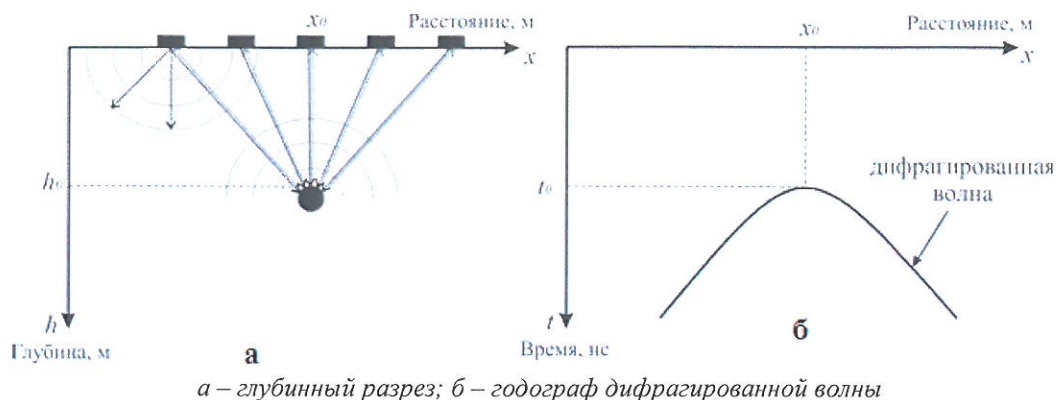


Рисунок 10.14 – Схема образования дифрагированной волны от локального объекта, залегающего на глубине h_0

– В георадиолокации различают горизонтальную и вертикальную разрешающие способности. Вертикальная разрешающая способность связана с длиной волны, горизонтальную разрешающую способность определяет эффективная отражающая площадка.

– Разрешающей способностью по вертикали (глубине) называют минимальное расстояние между поверхностями, при котором их можно наблюдать как две отражающие границы, иными словами, чтобы отражённые импульсы от этих поверхностей определялись на данных георадара как два разных импульса. Разрешающая способность по глубине рассчитывается как расстояние, не меньшее $\frac{1}{4}$ длины волны. Вертикальная разрешающая способность зависит только от параметров сигнала и среды и не зависит от глубины положения границ.

– Горизонтальной (пространственной) разрешающей способностью называется минимальное расстояние по горизонтали, на котором могут быть различимы два отражающих объекта, находящихся на одной глубине, или их детали. Горизонтальная разрешающая способность определяется исходя из следующего утверждения: для разделения объектов по горизонтали на глубине h необходимо, чтобы они находились на расстоянии, не меньшем диаметра эффективной области отражения: $\Delta l \geq \sqrt{2\lambda h}$.

– Разрешающая способность по площади уменьшается с глубиной: глубоко залегающий объект должен иметь большие размеры, чтобы эффект от него был таким же, как в случае залегающего на небольшой глубине не крупного объекта.

– Под параметрами методики в георадиолокации понимают:

– режим работы аппаратуры (центральная частота, размер окна записи (развёртка), частота дискретизации, число накоплений сигналов при записи);

– расположение источников и приёмников: положение профилей и расстояние между ними, расстояние между точками на профиле, расстояние между источником и приёмником.

– Разбивка и привязка сети наблюдений должна производиться до начала проведения работ в соответствии с действующими нормативно-методическими документами по топографо-геодезическим работам.

– Георадарные наблюдения ведутся по методике профилирования на постоянной базе: расстояние между источником и приёмником постоянно, минимально и принимается равным нулю. Профили, по возможности, прокладывают прямые, с постоянным расстоянием между точками измерений (трассами).

– Георадиолокационные наблюдения ведутся в трёх режимах работы аппаратуры: непрерывном, по шагам и по перемещению. В режиме «по перемещению» излучение, приём и запись происходят по мере перемещения антенны по профилю: одной точке на профиле соответствует один цикл работы. Расстояние между точками задаёт оператор перед началом работы аппаратуры, движение контролируется с помощью одометра и мерного колеса. В непрерывном режиме работы аппаратуры циклы «излучение – приём – запись» следуют друг за другом независимо от пройденного расстояния. В режиме работы «по шагам» циклы работы георадара контролируются оператором; для записи каждой трассы (каждого цикла) необходимо дать соответствующую команду.

– Преимущественным является режим работы «по перемещению». В случае, когда работа с одометром невозможна, измерения ведутся в непрерывном режиме, если точная привязка георадарных трасс не принципиальна, или в режиме по шагам, когда необходимо знать координаты каждой трассы.

– Центральная частота антенны должна выбираться исходя из требуемой по условиям Технического задания глубинности, разрешающей способности или размеров обследуемого объекта. На основе расчёта необходимой разрешающей способности выбирают центральную частоту исследований и соответствующую антенную систему для конкретного георадара, которая должна обеспечить запись полезного сигнала (соответствующей дифрагированной или отражённой волны), в пределах указанного в паспорте прибора динамического диапазона записи.

– Для решения комплексных задач необходимо поводить наблюдения по одним и тем же профилям с несколькими антеннами с разными центральными частотами.

– Временной интервал записи (развёртка) должен, как минимум, превышать двойное время пробега до самого глубокого объекта исследований плюс длительность сигнала. Развёртку можно рассчитать по формуле

$$W = 1,3 \frac{2 \cdot H_{max}}{V_{min}}, \quad (10.1)$$

где H_{max} – максимальная глубина;

V_{min} – минимальная средняя скорость в исследуемой среде.

Множитель 1,3 увеличивает время развёртки на 30%, чтобы учесть возможные вариации в глубине и скорости.

– Оптимальной частотой дискретизации записи является частота, в 6 раз превышающая центральную частоту антенны, указанную в паспорте.

– Для улучшения соотношения сигнал/шум необходимо использовать накопление сигналов. Накопление сигнала неэффективно для когерентных помех, таких как аппаратный шум или воздушные отражения. Число накоплений необходимо выбирать в соответствии с разумным соотношением увеличения времени полевых работ и реальным улучшением записи. Оптимальным числом накоплений является 8-16.

– Расположение георадарных профилей и точек наблюдений должно обеспечивать получение оптимального количества данных для решения поставленной задачи.

– При картировании протяжённых границ профили прокладывают от скважины или шурфа в направлении другой скважины или шурфа или иных опорных пунктов определения параметров разреза.

– При поиске и картировании протяжённых объектов, длина которых много больше поперечных размеров, профили располагают перпендикулярно объекту.

– При поиске и картировании изометричных в плане локальных объектов проектируют ряд параллельных профилей, покрывающий обследуемую площадь. При поиске аномальных зон, отличающихся от вмещающей среды по своим физическим или электромагнитным свойствам, длину профилей следует выбирать так, чтобы они пересекали не только аномальную, но и «нормальную» зоны. Такими аномальными зонами могут быть зоны нарушенного залегания грунта – засыпанных раскопов, ослабленных грунтов с повышенной влажностью.

– Наблюдения на непродольных профилях в сочетании с наблюдениями на продольных следует использовать для изучения крутопадающих и наклонных границ, для поиска и дифференциации линейных и изометричных объектов. Непродольный профиль необходимо располагать перпендикулярно продольному. Наблюдения на непродольном профиле должны быть увязаны с наблюдением на продольном профиле.

– Наблюдения, как правило, должны проводиться с равными расстояниями (Δx) между точками излучения и приёма, обеспечивающими надёжную фазовую корреляцию полезных волн.

– Расстояния между точками наблюдения на профиле должны быть такими, чтобы обеспечивалось условие не менее 80% перекрытия первых зон Френеля (эффективных областей отражения) на целевой границе (объекте). Диаметр эффективной области отражения D для границы, залегающей на глубине h , равен

$$D = \sqrt{2\lambda h}, \quad (10.2)$$

где λ – длина волны.

– При пересечении профилем вытянутого дифрагирующего объекта типа трубопровода шаг наблюдений по профилю или скорость перемещения выбираются с учётом того, что дифрагированные волны прослеживаются, как правило, в интервале 1,5-2 глубины заложения верхней кромки объекта в обе стороны от его оси.

– Для определения скоростного закона для точного пересчёта времён прихода отражённых волн в глубины границ необходимо проводить георадиолокационные зондирования с изменением расстояния между источником и приёмником.

– Зондирования обязательно проводить, когда определение глубины границ с заданной точностью другими способами невозможно. Это случаи отсутствия объектов дифракции в разрезе, недостаточное число точек прямых наблюдений, большой горизонтальный градиент влажности и т.п.

10.2.2 Подготовка к проведению испытаний

– При производстве работ масштабы и густоту расположения сети наблюдений устанавливают в зависимости от стадии изысканий, сложности геологического строения изучаемой территории, требуемой точности результатов, и определяются они целями и поставленными задачами.

– При детальном работах густота сети выбирается такая, чтобы обеспечивалась достаточная точность отображения изучаемого объекта (структуры) в плане. Расстояние между профилями должно быть таким, чтобы обеспечивалось условие не менее 50% перекрытия первых зон Френеля (см. выше) на целевой границе (объекте).

- Георадиолокационные профили необходимо совмещать с другими геофизическими профилями (сейсмическими, электроразведочными и др.) с целью совместной интерпретации всех геофизических материалов.
- Сеть профилей должна быть увязана с результатами прямых наблюдений (скважинами, шурфами и пр.), расположенными на исследуемой площади.
- Для уверенной интерпретации результатов георадиолокационных работ следует в обязательном порядке проводить параметрические наблюдения вблизи скважин, на обнажениях, в котлованах.

10.2.3 Аппаратура

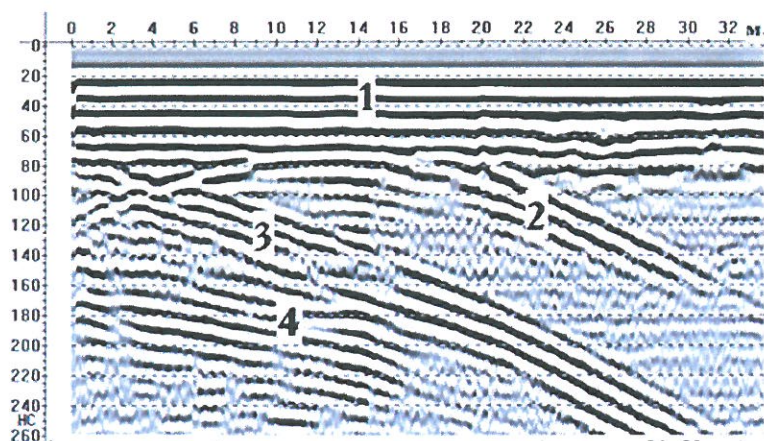
- Для проведения полевых георадиолокационных работ необходимо использовать георадары, параметры которых соответствуют техническим требованиям и поставленным задачам.
- Георадар состоит из: устройства синхронизации, блока питания, генератора сигналов, антенны (одной или несколько), АЦП и устройства управления, регистрации и визуализации принятых сигналов.
- Выбор используемого антенного блока зависит от требуемых глубинности и разрешающей способности и должен осуществляться согласно рекомендательной таблице (таблица 10.1).

Т а б л и ц а 10.1 – Глубина георадарного зондирования на различных частотах

Техническая характеристика	Центральная частота, МГц				
	150-250	400-500	700-900	1000-1500	1500-2500
Максимальная глубина зондирования, м	3-15	2,0-5	1,0-3	0,5-1,5	0,2-0,7
Разрешающая способность, м	0,25-0,35	0,12-0,15	0,05-0,07	0,01-0,05	0,005-0,01

10.2.4 Обработка данных

Компьютерная обработка георадарных данных должна проводиться для выделения полезного сигнала на фоне шумов и помех. Это могут быть регулярные помехи, например, такие как собственный шум аппаратуры или отражения от объектов в верхнем полупространстве: деревьев, зданий и прочие «воздушные волны», так и нерегулярные электромагнитные шумы техногенного происхождения (рисунок 10.15).



1 – сигнал прямого прохождения; 2–3 – «воздушные волны»; 4 – полезные отражения

Рисунок 10.15 – Пример георадиолокационной записи с помехами

Компьютерная обработка георадарных данных должна проводиться в специализированных программных пакетах, учитывающих физику распространения электромагнитного поля в геологической среде.

– Параметры процедур обработки должны задаваться в явном виде. Применение процедур обработки должно быть обосновано с позиции решения поставленной задачи.

– Ввод данных – первая процедура в любой системе обработки. Допускается запись полевых данных в формате, принятом в фирме-производителе георадара, использованного во время полевых работ. Вывод окончательных результатов обработки в цифровом виде должен производиться в принятом международном формате (seg-у и т. п.).

– Перед цифровой обработкой необходимо проводить просмотр и редактирование данных. Во время просмотра определяются следующие параметры:

- наличие участков записи, не подлежащих включению в процесс дальнейшей обработки: записи калибровочных сигналов, пропуски на записи, бракованные в результате аппаратных сбоев участки записи;

- выбирается интервал времени для последующей обработки, который может быть равен или меньше интервала времени при записи в поле;

- выбирается количество трасс на единицу длины профиля, исходя из условий задачи исследований;

- определяется необходимость передискретизации трасс с большим шагом;

- выбирается шаг между трассами на профиле, больший шага съёмки.

– Все некондиционные, бракованные, не имеющие прямого отношения к решаемой задаче участки записи удаляются и не участвуют в дальнейшей обработке.

– Для получения георадарограммы, на которой расстояние между трассами устанавливается постоянным и равным определённой величине следует проводить масштабирование радарограммы. В зависимости от типа георадара масштабирование может осуществляться в автоматическом режиме, с помощью датчика пути или вручную, с помощью специальной утилиты, содержащейся в специальном пакете программ.

– Для корректного определения времени прихода, скорости электромагнитных волн и глубины до границ в начале цифровой обработки должно быть правильно задано время начала записи первого вступления сигнала.

– Для выравнивания динамического диапазона записи волнового поля должна выполняться коррекция амплитуд. Это введение коэффициента усиления, линейно или экспоненциально растущего с увеличением времени вдоль трассы. При этом амплитуда отражений, приходящих с больших глубин, должна выравниваться с амплитудой сигнала в начале записи. Параметры коррекции амплитуд задаются, как правило, в системе обработки в соответствии с инструкцией пользователя.

– Кроме коррекции амплитуд по линейному или экспоненциальному закону, для выравнивания динамического диапазона записи возможно применение автоматической регулировки усиления (АРУ) или усиление по закону, задаваемому пользователем.

– Если запись осложнена помехами и шумами (аппаратурными, вызванные деятельностью человека или возникающими из-за свойств среды) и необходимо визуально улучшить качество данных, должна применяться фильтрация. Различные виды фильтров также можно использовать для акцентирования каких-либо особенных черт радарограмм для дополнения в интерпретацию новых характеристик среды.

– В случаях, когда частотный спектр помехи или шума занимают на оси частот интервал, отличный или лишь частично перекрывающийся с частотным диапазоном сигнала, необходимо применять частотную фильтрацию. В тех случаях, когда частотные диапазоны помехи и полезного сигнала значительно перекрываются или совпадают, частотная фильтрация может не приводить к улучшению результата в отношении обнаружения или более уверенного прослеживания осей синфазности полезных волн. Параметрами процедуры фильтрации являются вид фильтра (например, полосовой с трапецидальными срезами, Баттерворта, Ормсби и т.д.), полоса частот фильтра, крутизны срезов частотной характеристики фильтра.

– В случаях, когда помеха или шум и полезное волновое поле имеют разные характеристики во временной области, необходимо применять временную фильтрацию в модификации осреднения или вычитания.

– Для повышения разрешающей способности возможно применение деконволюции.

– В случае необходимости учёта рельефа местности для интерпретации георадиолокационных данных применяется процедура учёта рельефа или ввода статических поправок. С этой целью используются абсолютные или относительные значения высот расположения точек георадиолокационной съёмки.

– Для правильного восстановления пространственного распределение отражающих границ и объектов на временном разрезе должна применяться процедура миграции. Корректное применение этой процедуры невозможно без знания значений скорости распространения электромагнитных волн в разрезе.

– Для получения дополнительной информации о среде можно использовать такие процедуры как преобразование Гильберта, расчёт атрибутов георадиолокационной записи.

– Для получения информации о глубине положения границ и/или объектов, необходимо знать скорость распространения электромагнитных волн в исследуемой среде.

– Если данные получены с помощью метода непрерывного профилирования, информацию о скоростях в разрезе возможно получить с использованием дифрагированных волн или с использованием априорной информации о положении отражающих границ в разрезе (колонки скважин, шурфов, находящихся на профиле или в непосредственной близости).

– В системе обработки георадиолокационных данных должно быть предусмотрено определение эффективной скорости и глубины до объекта дифракции по дифрагированным волнам путём сравнения наблюдаемой оси синфазности дифрагированной волны с теоретической гиперболой. Для корректного определения скорости этим способом необходимо правильное задание координаты трасс на профиле и времени начала записи.

– Если определение скоростей с заданной точностью, детальностью и глубинностью в разрезе с помощью гипербол дифракции или с помощью априорной информации невозможно, скорость определяют по георадарограммам зондирований. Технически этот приём должен быть реализован в системе обработки подобно определению скорости по гиперболе дифракции, только теоретическая гипербола построена на основании уравнения годографа не дифрагированной, а отражённой волны.

– Надёжность определения скоростей необходимо систематически контролировать на основе сопоставления получаемых результатов с данными других геофизических методов и данными прямых наблюдений.

– Выделение и прослеживание волн (корреляция) производится по комплексу динамических и кинематических характеристик, среди которых наибольшее значение имеют повторяемость формы записи на соседних трассах и плавное изменение интенсивности записи от трассы к трассе.

10.2.5 Интерпретация данных

– Задача интерпретации данных георадиолокационной съёмки состоит в преобразовании исходных радарограмм в когерентный разрез, отражающий картину залегания основных структурных слоёв и каких-либо локальных объектов.

– После проведения скоростного анализа необходимо пересчитать временной разрез (георадарограмму) в разрез глубинный (см. ниже). При пересчёте временного разреза в глубинный используется модель среды, в которой во временном масштабе пропикированы все отражающие границы и иные объекты. В каждом выделенном слое скорость распространения волн имеет своё значение, и коэффициент пересчёта временного интервала между двумя осями синфазности однократно отражённых от кровли и подошвы слоя волн будет иметь своё значение.

– Построение георадиолокационных разрезов необходимо начинать с анализа полученных георадарограмм, позволяющего на основе имеющихся геолого-геофизических материалов составить схематическую георадиолокационную модель участка работ.

– Основными элементами схемы (интерпретационной модели) должны служить представления о числе слоёв в разрезе, о пространственном распределении их по разрезу и площади и о характере распределения скоростей по горизонтали и вертикали.

– Каждый георадиолокационный разрез должен быть подвергнут анализу в отношении присутствия фиктивных границ, связанных с неправильным распознаванием волн на георадарограммах; при этом особое внимание следует уделять обнаружению границ, обусловленных присутствием на записи кратных волн или волн, пришедших из воздушного пространства.

– На георадиолокационном разрезе следует указывать:

- номер профиля;
- масштаб (вертикальный и горизонтальный);
- рельеф дневной поверхности;

- точки излома и пересечения профилей;
- местоположение скважин и колонки по ним.
- На разрезе отмечаются участки (зоны) с аномальными значениями динамических параметров записи. На основе пространственного положения таких аномалий выделяются участки повышенного увлажнения, засоленности и т. п.
- По георадиолокационным разрезам составляются карты и схемы, на которых изолиниями показано положение опорных горизонтов. Расстояние между изолиниями должно быть равно удвоенной ошибке определения глубин. При исследовании структур с малой амплитудой и высокой плотностью наблюдений допускается сечение изолиний, равное ошибке определения глубин.
- При интерпретации данных применяется атрибутивный анализ волнового поля (см. п. 9.2.4 настоящего Руководства), который позволяет существенно облегчить выделение аномальных участков повышенной влажности, областей разуплотнения, пустот.

10.3 Возможности и ограничения методов

Наземная сейсморазведка

- Основные задачи, решаемые сейсмическими методами:
 - уточнение литологического строения верхней части разреза;
 - поиск и локализация ослабленных зон, зон разуплотнения, просадок и иных проявлений суффозионных процессов в толще четвертичных отложений;
 - определение положения кровли регионального водоупора и оценка его состояния, с выделением зон пониженной плотности, через которые потенциально может происходить фильтрация грунтовых вод;
 - определение положения уровня грунтовых вод и наличия активных фильтрационных процессов в толще четвертичных пород;
 - выделение зон переувлажнения и разуплотнения в верхней части разреза;
 - уточнение инженерно-геологических условий участка работ.
- Сейсморазведку не стоит применять при условиях:
 - покрытия поверхности земли бетонными и железобетонными плитами толщиной более 0,5 м;
 - высокого уровня неустраняемых механических шумов от работающих механизмов и транспорта;
 - невозможности обеспечить длину профиля наблюдений, позволяющую достигнуть требуемую по условиям задачи глубинность.

Георадиолокационное профилирование

- Основные задачи, решаемые методом георадиолокации при поиске мест потенциальных провалов и обследовании областей просадочных воронок на поверхности:
 - уточнение литологического строения верхней части разреза;
 - поиск и локализация ослабленных зон, зон разуплотнения, просадок и иных проявлений суффозионных процессов в толще техногенных грунтов и четвертичных отложений;
 - определение областей повышенного увлажнения, в том числе признаков наличия активных фильтрационных процессов в толще четвертичных пород.
- Применение поверхностной георадиолокации малоэффективно:
 - при покрытии поверхности земли бетонными и железобетонными плитами и другими проводящими материалами;
 - при наличии в изучаемом разрезе грунтов с высокой проводимостью (глин, влажных суглинков, засоленных грунтов).

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бауков А.Ю. Повышение устойчивости подземных сооружений и совершенствование технологии их ремонта на основе виброакустической диагностики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2007. — №12. — С. 93–99.
2. Бауков А.Ю., Павлов С.В. Результаты экспериментальных исследований колебаний многослойных систем при ударном воздействии на объемной модели // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — №3. — С. 116–123.
3. Бауков А.Ю. О физике процессов изгибных колебаний пластин при ударном воздействии различной длительности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — №10. — С. 151–156.
4. Богов С.Г. Проблемы устройства свайных оснований в городской застройке в условиях слабых грунтов Санкт-Петербурга // интернет-журнал «Развитие городов и геотехническое строительство» — 2004. — №8. — С. 119–128.
5. Владов М.Л., Капустин В.В. Диагностика карстовой опасности и суффозионной неустойчивости основания земляного полотна // Путь и путевое хозяйство. — 2014. — № 11. — С. 28–34.
6. Владов М.Л. Применение сейсмоакустических методов в системе мониторинга гидротехнических сооружений / М.Л. Владов, В.В. Капустин, В.А. Стручков [и др.] // Геотехника. — 2017. — № 5. — С. 32–42.
7. Владов М.Л. Томографические просвечивания при больших межскважинных расстояниях: негативные факторы / М.Л. Владов, В.А. Стручков, М.С. Судакова, Д.В. Шмурак // Инженерные изыскания. — 2020. — Т. 14, № 2. — С. 42–51.
8. Исаев Ю.С. Оценка качества возведения «стены в грунте» по данным сейсмоакустического межскважинного просвечивания / Ю.С. Исаев, О.В. Бойко, К.А. Дорохин, Е.В. Костромитина // Метро и тоннели. — 2016. — №6. — С. 13–16.
9. Ермаков А.П. Опыт применения многоволновой сейсморазведки при оценке карстовой опасности / А.П. Ермаков, М.Л. Владов, Д.В. Шмурак // Инженерные изыскания. — 2016. — № 5–6. — С. 52–59.
10. Капустин В.В. Некоторые особенности обработки георадарных данных при исследовании строительных конструкций / В.В. Капустин, Ю.А. Строчков // Разведка и охрана недр. — 2008. — № 1. — С. 22–25.
11. Капустин В.В. Применение волновых методов для определения длины свай // Технологии сейсморазведки. — 2009. — № 2. — С. 113–117.
12. Капустин В.В. Использование технологий направляемых акустических волн для исследования грунтов и строительных конструкций // Технологии сейсморазведки. — 2012. — № 1. — С. 72–78.
13. Капустин В.В. Возможности комплекса методов скважинной сейсмоакустики и электрометрии при оценке закарстованности и суффозионной неустойчивости грунтов на застроенных территориях / В.В. Капустин, В.А. Истратов, А.А. Бобачев // Инженерные изыскания. — 2013. — № 5. — С. 72–78.
14. Капустин В.В. Применение способов автоматизированного определения диэлектрической проницаемости среды при решении прикладных задач георадиолокации / В.В. Капустин, А.В. Синицин // Геофизика. — 2014. — № 6. — С. 39–45.

15. Капустин В.В. Применение комплекса геофизических методов при исследовании фундаментных плит / В.В. Капустин, А.В. Кувалдин // Технологии сейсморазведки. — 2015. — №1. — С. 99–105.
16. Капустин В.В. Применение комплекса сейсмоакустических и георадарных наблюдений при обследовании состояния гидротехнических сооружений / В.В. Капустин, А.Ю. Хмельницкий // Геотехника. — 2014. — № 1–2. — С. 74–85.
17. Капустин В.В. Возможности сейсмоакустических и ультразвуковых методов при контроле качества свайных фундаментов / В.В. Капустин, А.А. Чуркин, И.Н. Лозовский, А.В. Кувалдин // Геотехника. — 2018. — Т. 10, № 5–6. — С. 62–71
18. Капустин В.В. Применение динамических атрибутов акустического сигнала для оценки контакта свай с вмещающими грунтами / В.В. Капустин, А.А. Чуркин // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2020. — № 3. — С. 126–137.
19. Лебедев М.О. Инженерно-геофизические исследования при реконструкции подземных сооружений / М.О. Лебедев, К.В. Романевич // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 5. — С. 97–110.
20. Лозовский И.Н. Определение местоположения дефектов в стене из бурящихся свай методом электроразведки на сооружении вентиляционного ствола Московского метрополитена / И.Н. Лозовский, А.А. Чуркин // Метро и тоннели. — 2018. — № 2. — С. 32–35.
21. Лозовский И.Н. Контроль сплошности буронабивных свай методом межскважинной ультразвуковой томографии / И.Н. Лозовский, А.А. Чуркин // Транспортное строительство. — 2018. — № 7. — С. 6–9.
22. Мухин А.А. О техническом регулировании неразрушающего контроля сплошности свай / А.А. Мухин, В.В. Капустин, А.А. Чуркин, И.Н. Лозовский // Геотехника. — 2019. — Т.10, №2. — С. 80–89.
23. Мухин А.А. Неразрушающий контроль сплошности бетона буронабивных свай термометрическим методом / А.А. Мухин, И.Н. Лозовский, А.А. Чуркин // Транспортное строительство. — 2018. — № 10. — С. 6–9.
24. Мухин А.А. Технические стандарты ООО ЭГЕОС по применению неразрушающего контроля сплошности свай. Ультразвуковой метод / А.А. Мухин, И.Н. Лозовский, А.А. Чуркин // Геотехника. — 2019. — Т. 11, № 3. — С. 64–79. — № 4. — С. 68–78. — Т. 12, № 1. — С. 74–86.
25. Мухин А.А. Ограничения области применения сейсмоакустического метода контроля сплошности бетона свай / А.А. Мухин, А.А. Чуркин, И.Н. Лозовский // Транспортное строительство. — 2018. — № 9. — С. 20–24.
26. Набатов В.В. Обработка данных георадиолокационной съемки при выявлении полостей в заобделочном пространстве / В.В. Набатов, Р.М. Гайсин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 1. — С. 19–25.
27. Фоменко Н.Е. Комплексные геофизические исследования для определения положения и причин деформаций железнодорожной насыпи / Н.Е. Фоменко, Д.А. Гапонов, В.В. Капустин // Геофизика. — 2015. — № 1. — С. 51–59.
28. Фоменко Н.Е. Возможности георадарного метода при обследовании подпорных стен и ограждающих конструкций / Н.Е. Фоменко, Д.А. Гапонов, В.В. Капустин, В.В. Попов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2017. — Т. 328, № 3. — С. 37–46.

29. Фоменко Н.Е. Исследование техногенно-закрепленных грунтов основания фундаментов радиолокационным и сейсмическими методами в условиях длительно эксплуатируемого объекта культурного наследия / Н.Е. Фоменко, В.В. Капустин, Д.А. Гапонов, Л.Н. Фоменко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2018. — Т. 329, № 8. — С. 16–29.
30. Хмельницкий А.Ю. Экспериментальные исследования влияния вмещающего грунта на распространение сейсмических волн в свайных конструкциях / А.Ю. Хмельницкий, В.В. Капустин, М.Л. Владов // Инженерные изыскания. — 2012. — № 6. — С. 16.
31. Черняков А.В. Контроль качества геотехнических конструкций, созданных методом струйной цементации / А.В. Черняков, О.В. Богомолова, В.В. Капустин, М.Л. Владов [и др.] // Технологии сейсморазведки. — 2008. — № 3. — С. 97–103.
32. Черняков А.В. Применение комплекса геофизических и геотехнических методов для организации контроля качества скрытых работ и мониторинга при крупном городском строительстве / А.В. Черняков, О.В. Богомолова, В.В. Капустин, В.А. Истратов, А.А. Бобачев // Геотехника. — 2013. — № 1. — С. 4–21.
33. Чуркин А.А. Комплексное исследование качества буронабивных свай на опытной площадке с использованием методов неразрушающего контроля / А.А. Чуркин, И.Н. Лозовский, В.Е. Фролов, Ю.Н. Бровиков // Геотехника. — 2018. — Т. 10, № 5–6. — С. 72–83
34. Чуркин А.А. Контроль качества «стен в грунте» геофизическими методами / А.А. Чуркин, И.Н. Лозовский // Construction and Geotechnics. — 2020. — Т. 11, № 2. — С. 49–61.
35. Чуркин А.А. Развитие методики применения геофизического комплекса для контроля качества заглубленных монолитных конструкций. Дисс. ... канд. техн. наук, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва. 2020.
36. Чотчаев Х.О. Комплексование методов сейсморазведки (МПВ) и геолокационного зондирования для выделения геотектонических и геотехнических особенностей разреза Рокского тоннеля / Х.О. Чотчаев, В.Д. Шепелев // Геология и геофизика Юга России. — 2014. — № 1. — С. 51–62.
37. Amir E. I., Amir J. M. Statistical Analysis of a Large Number of PEM Tests on Piles // Proc. 3rd Conf. Application of Stress-Wave to Piling, Lisbon — 2008.
38. Amir J.M & Amir E.I & Felice, C.W. Acceptance criteria for bored piles by Ultrasonic Testing // Proc. 7th Intl. Conf on Application of Stress Wave Theory to Piling, Kuala Lumpur — 2004.
39. Amir J.M & Amir E.I. Capabilities and Limitations of Cross Hole Ultrasonic Testing of Piles // Proc IFCEE, Orlando — 2009.
40. Amir J.M. Pile Integrity Testing: History, Present Situation and Future Agenda // Proc. 3rd Bolivian Intl. Conf. Deep Foundations, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia — 2017.
41. Axtell P.J., Stark T.D. Increase in shear modulus by soil mix and jet grout methods // DFI Journal. — Vol. 2. — No. 1. — 2008. — p. 11-21
42. Bungenstab F.C., Beim J.W. Continuous Flight Auger (CFA) piles – A review of the execution process and integrity evaluation by low strain test // From fundamentals to Application in geotechnics, IOS Press — 2015. — p. 414-421.

43. Cheng C.-C., Yu C.-P., Liou T. Evaluation of interfacial bond condition between concrete plate-like structure and substrate using the simulated transfer function derived by IE // NDT & E International, Volume 42, Issue 8, 2009, pp. 678-689
44. Johnson, K. R. Analyzing thermal integrity profiling data for drilled shaft evaluation // DFI Journal – The Journal of the Deep Foundations Institute. Vol.10, No. 1, 2016
45. Galindo Guerreros J.C., Neiderleithinger E., Mackens S., Fechner T. Quality assurance of jet grout columns with borehole seismic measurements // Proceedings of International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, Germany, September 15-17, 2015
46. Goel A. Applicability of SASW method for subsurface structural evaluation of layered asphalt pavements // Proceedings of NDE 2017 Conference of the Indian Society for NDT (ISNT), Chennai, India, 2017
47. Hussein M.H., Goble G.G. A brief history of the application of stress-wave theory to piles // Geotechnical Special Publication, July 2004
48. Kase E., Ross T. Using seismic tomography to evaluate foundation structures // Proceedings of the 28th Annual Conference on Deep Foundations, USA, 2003
49. Kirilenko A., Znaychenko P., Kapustin V. Integrated Solutions in Structural Diagnostics // Proceedings of the Int. Conf. Structural Faults + Repair 2010, Edinburgh, UK, 2010. - P. 12-16.
50. Korff M., van Tol A.F., Jong E. Risks related to CFA-pile walls // Proceedings ECSMGE, Madrid, 2007
51. Kravitz B., Mooney M., Karlovsek J., Danielson I., Hedayat A. Void detection in two-component annulus grout behind a pre-cast segmental tunnel liner using Ground Penetrating Radar // Tunneling and underground space technology, vol. 83, no 1, pp. 381-392, 2019
52. Liang L., Beim J. Effect of soil resistance on the low strain mobility response of piles using impulse transient response method // Proc. 8th Intl. Conf on Application of Stress Wave Theory to Piling, Lisbon, 2008
53. Likins G.E., Rausche F., Webster K., Klesney A. Defect Analysis for CSL Testing // Geotechnical Special Publication No. 158 Contemporary Issues in Deep Foundations; Proceedings from Geo-Denver 2007 New Peaks in Geotechnics: Denver, CO., 2007
54. Loseva E., Osokin A., Mironov D., Dyakonov I. Specific features of the construction and quality control of pile foundations in engineering and geological conditions of Saint Petersburg // Architecture and engineering, vol. 5, no 2, pp. 38-45, 2020
55. Zhi Tang Lu, Zhi Liang Wang, Dong Jia Liu. A study on the application of the parallel seismic method in pile testing // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, № 55, pp. 255-262, 2013
56. Mackens S., Fechner T., Rios N.I.C., Tweeton D., Guerreros J.C.G., Neiderleithinger E. A new approach to determine the diameter of a jet grouted column using seismic methods // Proceedings of SAGEEP, Austin, Texas, 2015
57. Mullins G. Thermal integrity profiling of drilled shafts // DFI Journal – The Journal of the Deep Foundations Institute, vol. 4, no 2, pp. 54-64, 2012
58. Niederleithinger E., Amir, J.M. Hubner M. Crosshole sonic logging of secant pile walls - A feasibility study. // Symposium on the application of geophysics to environmental and engineering problems (SAGEEP), Keystone, USA, 2010

59. Pisciacko G., Likins G., Mullins G. Drilled shaft acceptance criteria based upon Thermal Integrity Profiling // Deep Foundations Institute 41st Annual Conference on Deep Foundations, New York, 2016
60. Rausche F., Shen R-K., Likins G. A comparison of Pulse Echo and Transient Response pile integrity test methods // Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C., 1991
61. Ryden N., Park C.B., Ulriksen P., Miller R.D. Multimodal approach to seismic pavement testing // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. — Vol. 130, No 6, — 2004. — P. 636-645
62. Sellountou A.E., Amir J., Canivan G., Chernauskas L., Hertlein B., Kandararis P., Kovacs T., Likins G. Terminology and Evaluation Criteria of Crosshole Sonic Logging (CSL) as applied to Deep Foundations // DFI Task force, October 2019
63. Sellountou A.E., Alvarez C., Rausche F. Thermal integrity profiling: A recent technological advancement in integrity evaluation of concrete piles // Proceedings from the First International Conference, Seminar on Deep Foundations: Santa Cruz, Bolivia, 2013
64. Song K.-I., Cho G.-C. Numerical study on the evaluation of tunnel shotcrete using the Impact-Echo method coupled with Fourier transform and short-time Fourier transform // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 47, Issue 8, 2010, pp. 1274-1288.
65. Spruit R., Hopman V., Van Tol A.F., Broere W. Detecting defects in diaphragm walls prior to excavation // Proceedings of the 8th International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics 12-14 September — Berlin, Germany, 2011. — P. 1–14.
66. Spruit R., van Tol F., Broere W., Slob E., Niederleithinger E. Detection of anomalies in diaphragm walls with crosshole sonic logging // Canadian Geotechnical Journal. — 2013. — Vol. 51, № 4. — P. 369–380.
67. Shi-Wei H., Shi-Jian H., Shao-Po G., Zeng Y.Q. The Research of Multi-defective Piles for Low Strain Testing and Numerical Simulation // The 2016 Structures Congress, Korea, 2016
68. Tang H., Long S., Li T. Quantitative evaluation of tunnel lining voids by acoustic spectrum analysis // Construction and Building Materials, Vol. 228, 2019, Article No 116762.
69. Tinkey Y., Olson L.D. Impact-echo scanning for grout void detection in post-tensioned bridge ducts – findings from a research project and a case history // Proceeding of ASCE Structures Congress, Long Beach, California, 2007
70. Voznesenskii A.S., Nabatov V.V. Identification of filler type in cavities behind tunnel linings during a subway tunnel surveys using the impulse-response method // Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 70, 2017, pp. 254-261.
71. Wang, H., Nguyen T. V., Wang C.-Y., 2018. Vertical Profiling Ultra-Seismic Inspection to Evaluate Model Pile Depths // Proceedings of NDE/NDT for Highways & Bridges: SMT, August 2018.
72. Wang Z., Chen L., Xiao Z. Quantitative Analysis of Low-strain Characteristics on Defective Piles with Constriction or Segregation // The Open Civil Engineering Journal, №9, China, 2015
73. Webster K., Rausche F., Webster S. Pile and shaft integrity test results, classification, acceptance and/or rejection // TRB 2011 Annual Meeting, 2011

74. Wharmby N., Perry B., Waikato H. Development of Secant Pile Retaining Wall Construction in Urban New Zealand // Proceedings of the New Zealand Concrete Industry Conference, 2010. – Wellington, New Zealand, 2010. – P. 1–8.

75. Zhang S., He W., Li Y., Yuchi Z. Thickness Identification of Tunnel Lining Structure by Time–Energy Density Analysis based on Wavelet Transform // Engineering Science and Technology Review. — 2019. — Vol. 12, № 4. — P. 28–37.

76. Zheng C., Kouretzis G., Ding X., Liu H. Three-dimensional effects in low-strain integrity testing of piles: Analytical solution // Canadian Geotechnical Journal. — 2016. — Vol. 53, № 2. — P. 225–235.

Приложение А. Рекомендуемая геофизическая аппаратура

А.1 Аппаратура для наземных сейсмоакустических измерений

Сейсмоприёмники для наземных работ

Сейсмоприёмник GS-20DX

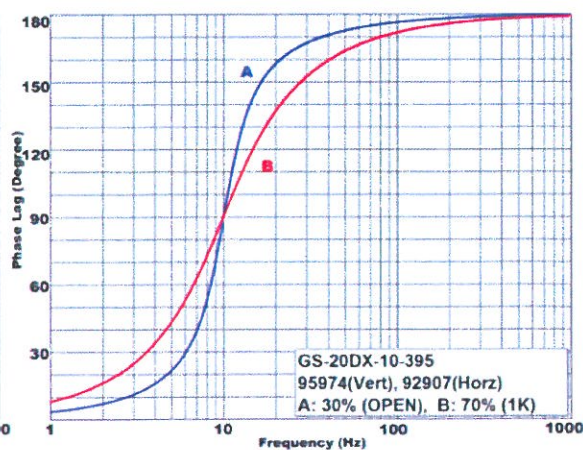
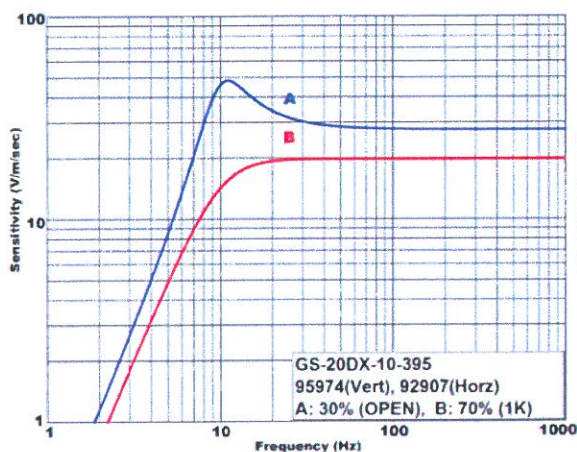


Сейсмоприёмник предназначен для преобразования вертикальных составляющих механических колебаний исследуемой среды в электрические. Допускается угол наклона – до 20° без ухудшения параметров.

Техническая характеристика



Собственная частота, Гц	10
Рабочий диапазон частот, Гц	10...250
Степень затухания	0,6
Коэффициент преобразования, В/м/с	20
Сопротивление обмотки, Ом	395
Нелинейные искажения, %, не более	0,2
Масса, кг	02



Амплитудно-частотная характеристика

Фазово-частотная характеристика

Геофон GS-20DX выпускается в двух частотных модификациях 10 Гц и 8 Гц, в вертикальном и горизонтальном исполнении, он подходит для различных сфер

применения, в том числе для сейморазведочных работ на нефть и газ, для горных работ, для инженерных и научных исследований, в системах охраны периметров.

Классическая надёжная конструкция. Предназначен для регистрации механических колебаний среды при проведении сейморазведочных работ во всех климатических зонах в диапазоне рабочих температур от минус 34 °С до плюс 71 °С.

Геофон GS-20DX выпускается в следующих вариантах:

- GS-20DX 10-395 VT-вертикальный
- GS-20DX 10-395 HZ-горизонтальный
- GS-20DX 8-395 VT-вертикальный
- GS-20DX 8-395 HZ-горизонтальный
- GS-20DX 10-395 Super

Варианты корпусов



Полевом корпусе PC-801

Горизонтальный полевой корпус PC-801 на уголке

Трёхкомпонентный корпус GS-3C

Болотный корпус PC-901

Изготовитель: СП «ОЙО-ГЕО Импульс»,
450001, г. Уфа, ул. Комсомольская, 2, тел. 25-39-73

При выполнении сейсмоакустического обследования свайных фундаментов и «стен в грунте» для регистрации упругих колебаний могут быть использованы сертифицированная 2-канальная высокочастотная сеймостанция ИДС-1 или ИДС-2 (производитель ООО «Логис», г. Раменское), 4-канальная сеймостанция Sigma-4 (компания Geodevice, С. Петербург) либо аналогичная аппаратура.



Сеймостанции ИДС-1, ИДС-2 и Sigma-4

Сейсморегистрирующий комплекс ИДС-1 имеет следующие технические параметры:

- число каналов – 2;
- полоса пропускания каналов, кГц – 8, 4, 2, 1, 0,5;
- частота квантования, кГц – 96, 32, 16, 8, 4, 2;
- число отсчётов в записи на канал – 2048;
- динамический диапазон, дБ – 95;

- запуск по обнаружению, по замыканию;
- диапазон рабочих температур $-30 \dots +50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- время непрерывной работы без подзарядки, ч – 10;
- масса, кг – 2,8.

Собранные данные записываются во внутреннюю память сейсмостанции, затем копируются на персональный компьютер и обрабатываются в специализированных программах.

Для работ импакт-методом при обследовании отделки тоннелей и фундаментных плит возможно применение специализированных приборов, соответствующих требованиям к аппаратуре, предъявляемым ASTM C1383–98a: Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method.

Примеры подобного оборудования:

1. Concrete Thickness Gauge (CTG-2) (Olson Instruments, USA)



Thickness Range 3.2" to 20" (81 mm to 50.8 cm) in standard mode	Thickness Range 3.2" to 20" (81 mm to 50.8 cm) in standard mode
20" to 6' (50.8cm to 1.8m) in thick mode	20" to 6' (50.8cm to 1.8m) in thick mode
Accuracy $\pm 2\%$ when calibrated on a known thickness	Accuracy $\pm 2\%$ when calibrated on a known thickness
Data Collection Works with most Windows 7-10 devices	Data Collection Works with most Windows 7-10 devices
Frequency Resolution 10Hz	Frequency Resolution 10Hz
Sampling Rate 45,454 samples/second	Sampling Rate 45,454 samples/second
Numbers of Samples Acquired per Test 4,545	Numbers of Samples Acquired per Test 4,545
Maximum Nyquist Frequency 22,700 Hz	Maximum Nyquist Frequency 22,700 Hz

2. DOCTer (Germann Instruments, Denmark)



3. s'MASH (Germann Instruments, Denmark)



4. Wireless Echo System (Impact-echo Instruments LLC, USA)



А.2 Аппаратура для скважинных сейсмоакустических измерений

1. Накопитель электрической энергии



Внешний вид накопителя электрической энергии для электроискрового источника JACK производства компании «ГЕОДЕВАЙС» [www.geodevice.ru], Российская Федерация.

Технические характеристики блоков возбуждения JACK производства компании «ГЕОДЕВАЙС» для электроискровых источников.

	JACK-500	JACK-1200	JACK-2500HP
Рабочее напряжение		2-4 кВ	
Тип зарядного устройства		импульсный	
Тип запуска		внешний / периодический / ручной	
Рабочая энергия	50-500 Дж	300-1200 Дж	300-2500 Дж
Скорость заряда	500 Дж/сек	500 Дж/сек	1500 Дж/сек
Минимальный период работы на минимальной энергии импульса	0.4 с	1.4 с	0.6 с
Минимальный период работы на максимальной энергии импульса	1.2 с	2.7 с	1.9 с
Параметры питающей сети	110 или 220 В, 50 Гц		
Потребляемая мощность	1 кВт	1 кВт	1/2/3 кВт
Габариты	490x370x230 мм	540x410x270 мм	630x500x300 мм
Масса	19 кг	22 кг	34 кг

2. Излучатель упругих волн в скважине

	JackPad
Функциональное назначение	дистанционное управление Jack
Максимальная длина линии связи	100 м
Габариты	210x165x90 мм
Масса	1 кг

Внешний вид скважинного излучателя электрической энергии для электроискрового источника JACK производства компании «ГЕОДЕВАЙС» [www.geodevice.ru], Российская Федерация.

Скважинный спаркер Pulse



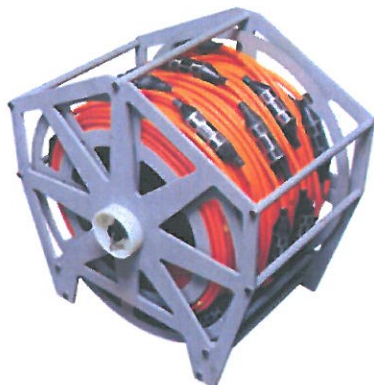
Электроискровой источник Pulse служит для возбуждения продольных (Р) волн в водонаполненных скважинах при выполнении межскважинного сейсмического просвечивания (МСП) и вертикального сейсмического профилирования (ВСП). Работа источника Pulse обеспечивается накопителем энергии Jack.

Накопитель Jack генерирует короткий высоковольтный электрический импульс значительной энергии, который обеспечивает формирование ионизированных парогазовых полостей высокого давления на электродной группе спаркера Pulse, помещённой в контейнер с солёной водой. При взрывном расширении парогазовой полости давление в ней резко падает, что приводит к резкому падению температуры, конденсации пара и последующему схлопыванию полости, которое не приводит к паразитным пульсациям.

Конструкция излучателя предусматривает лёгкую замену изнашиваемых электродных групп, что также позволяет управлять сигнатурой источника путём установки группы с другим числом электродов. Стандартные диаметры контейнеров составляют 36 / 60 / 80 мм, что позволяет работать в скважинах диаметром от 40 мм.

3. Приёмная скважинная система

Гидрофонная коса WellStreamer



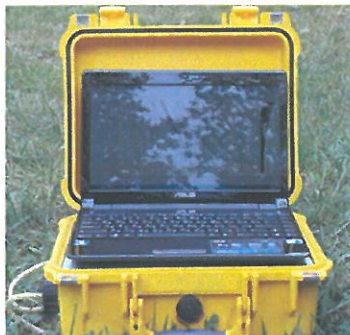
Внешний вид приёмной гидрофонной пьезокосы производства компании «ГЕОДЕВАЙС» [www.geodevice.ru], Российская Федерация.

Скважинная гидрофонная коса предназначена для выполнения скважинных сейсмических исследований на продольных (Р) волнах. В гидрофонных модулях используются высокочувствительные пьезокерамические сенсоры с предварительными усилителями сигнала. Стандартное число модулей на косе составляет 24 шт., но по желанию заказчика

может варьироваться в диапазоне от 1 до 48 модулей. Стандартный шаг между датчиками давления составляет 1 м, а общая длина косы может достигать 200 м и более.

4. Регистрация упругих колебаний

эллисс-3



Внешний вид сейсмического регистратора (сеймостанции) «Эллисс -3» производства компании «Геосигнал» [2].

Тип станции	линейная
Число каналов	1 – 96 шт.
Наличие электронного коммутатора	по желанию заказчика
Число служебных каналов регистрации	-
Разрядность АЦП	24 бит
Мгновенный динамический диапазон	120 дБ
Коэффициент усиления предварительного усилителя	0; 12; 24; 36; 48 дБ
Период дискретизации	0,0125; 0,05; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4 мс
Частотный диапазон	0 - 32 000 Гц
Максимальная длина записи, отсчётов на канал	8 192
Время задержки регистрации (предзапуска)	-
Максимальный входной сигнал при минимальном усилении	±2,5 В
Уровень собственных шумов регистрирующего канала	0,1 мкВ
Коэффициент нелинейных искажений	0,001 %
Взаимные влияния между каналами	130 дБ
Коэффициент подавления синфазного сигнала	100 дБ
Потребляемая мощность бортового комплекса	5,7 (48к) Вт
Мощность потребления	0,12 Вт/канал
Температурный диапазон бортового комплекса	-40 ... +70 °С
Масса бортового комплекса	2,9 (48к) кг

Оборудование для исследований в неглубоких скважинах производства фирмы Geotomographie GmbH (официальный сайт компании www.geotomographie.de)

Borehole Sources



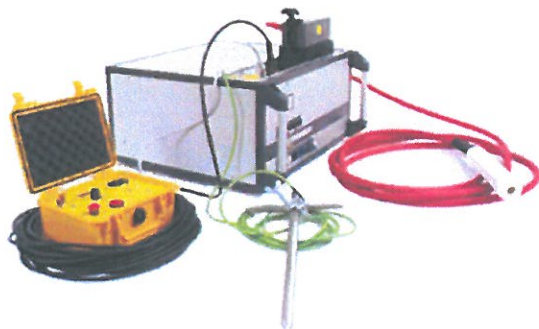
Generated wave types:	SH/P
Signal frequencies:	Up to 4 kHz (depending on geology and borehole distance)
Operational depth:	Up to 60 m
Source length:	880 mm
Source diameter:	65 mm
Source weight:	8.5 kg
Cable weight per metre:	665 g
Borehole diameter:	75 - 100 mm (or larger if spacers are used)
Clamping system:	Inflatable bladder
Orientation:	Torsionally stiff hose
Depth indicator:	Cable marking every 2 m
Connector:	To Impulse Generator IPG800
Storage:	On drum

Borehole Receivers



Natural sensor frequency:	10 Hz (others on request)
Sensor arrangement:	4 horizontal (45°)/1 vertical
Operational depth:	Up to 100 m
Receiver length:	600 mm
Receiver diameter:	51 mm
Receiver weight:	2.8 kg
Cable weight per metre:	145 g
Cable strength:	2150 N
Borehole diameter:	75 mm (or larger if spacers are used)
Clamping system:	Inflatable bladder
Depth indicator:	Cable marking every 2 m
Connector:	To any seismograph
Storage:	On drum

Power Supply



880

Generated wave types: SH/P
Signal frequencies: Up to 4 kHz
(depending on geology and borehole distance)
Operational depth: Up to 60 m
Source length: mm
Source diameter: 65 mm
Source weight: 8.5 kg
Cable weight per metre: 665 g
Borehole

diameter: 75-100 mm (or larger if spacers are used)
Clamping system: Inatable bladder
Orientation: Torsionally stiff hose
Depth indicator: Cable marking every 2 m
Connector: To impulse generator IPG800
Storage: On drum

Impulse voltage:	800 V
Impulse energy:	1000 J
Power supply:	2 x 12 V (car batteries)
Shot release:	Single or continuous (5/10 shots)
Repetition rate:	10 s
Dimensions:	53 x 43 x 23 cm
Weight:	15 kg
Special features:	Impulse counter
	Test trigger
	Emergency OFF button

А.3 Аппаратура для скважинных ультразвуковых измерений

1. CHUM (Piletest LLC)



<https://www.piletest.com/show.asp?page=chum>

CHUM - Technical Specifications

Physical Housing Dimensions Weight Temperature range Rugged, Environment-proof, water-resistant housing. 430mmL x 325mmW x 105mmH (instrument only) 3.8 kg (instrument only) 5.0 kg (instrument with typical tablet) 16.0kg (Typical shipping) Operating : -25°C to 60°C Storage : -40°C to 70°C Power Internal External Rechargeable Lithium Ion battery 11.1V 4.4Ah (two days of typical use) 100-240V AC operation/charging Standards ASTM D6760 –16 Meets or exceeds Technical Transducers Cables Sample rate Gain Depth meters Dual-Purpose transceivers, 50kHz nominal, pressure-tested housing, 25mm diameter Heavy-duty polyurethane wound on reel 500kHz (2 μ S resolution) 8 level automatic gain control (AGC) Two 24-bit counters.

2. CHAMP-Q (Pile Dynamics LLC)



<https://www.pile.com/products/champ-q/>

CHAMP-Q Specifications:

Main Unit

Physical

Size: 320 X 250 X 68 mm (12.6 x 9.8 x 2.7 inches)

Weight: 5 Kg (11 lbs.)

Temperature range: 0 to 40°C (32 to 104° F) operating; -20 to 65°C (-4 to 149° F) storage

Display: 26.4cm (10.4”), sunlight readable, resolution 1024 X 768

Built in capacitive touch screen

Video Outputs: HDMI

Power: 4-hour continuous data collection with internal 12V battery

Charging Time: 6-hour maximum

Electronic

Microsoft Windows® 10 Operating System

128 GB SSD internal drive

Ethernet port

4 USB ports

12-bit analog to digital (A/D) converter

Sampling rate: 500 kHz, 1 MHz and 2 MHz, user selectable (equivalent measuring accuracy 2 μ s, 1 μ s and 0.5 μ s)

Scan rate: 32 scans/seconds

Record size: 250, 500 and 1000 points, user selectable

User adjustable gain, trigger level, and transmit power level

Other

Operates in English or SI Units

Furnished with CHA-W software

Full one-year warranty

Technical manual provided in PDF form on a USB Drive

Probes

Physical

Size: 215 mm length x 25 mm diameter

Element: ceramic

Housing: nickel plated brass

Independent depth encoder for each probe

Maximum measuring distance (probe separation): 3m

Electronic

Receiver: tuned to 45 KHz nominal

Transmitter frequency (nominal): 45 KHz

Transmitter voltage: 800 volts

3. MCHA (Solgeo Srl)



© solgeo.com

Specifications

Overview	Specification	Processing software
Converter type	A/D, 2 x 16 bit	
Amplification	Driven by software; selectable gains 10x - 10240x	
Acquisition frequency	1 KHz – 2 MHz	
Acquisition buffer	Standard 32000 samples; maximum acquisition duration 8 s	
Filters	High-band 10 KHz (selectable by software)	
Trigger	Internal / external (selectable by software)	
I/O Box Unit and PC	Ethernet 10/100	
Case	Waterproof, IP67	
Power	From 110 to 240 Vac, 50-60 Hz	
Internal Battery	12 V, 7.2 A*h	
Autonomous work	8 h	
Total time of recharge	8 h	

А.4 Аппаратура для наземной георадиолокации

Для обследования обделок тоннелей можно использовать практически любые георадары с высокочастотными антенными блоками (800 МГц и более), например, георадар ОКО-2 с антенным блоком АБ-1200 (центральная частота 1200 МГц).

Общий вид



Рупорные антенные блоки

Применяемые при обследовании обделки антенные блоки георадаров

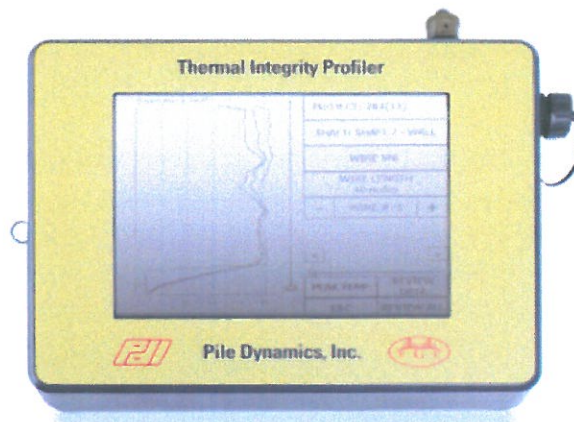
Пример комплектации георадара Зонд-12е для наземного георадиолокационного профилирования и обследования монолитных конструкций (сайт компании «Геосигнал»):



A.5 Аппаратура для скважинных термометрических измерений

1. Thermal Integrity Profiler (TIP) (PILE DYNAMICS, USA)

Наиболее совершенный по техническим характеристикам аппаратный комплекс, предназначенный для термометрического контроля качества свайных фундаментов и «стен в грунте». Ссылка на сайт производителя – <https://www.pile.com/products/tip/>



Thermal Integrity Profiler (TIP) Specifications

October 2019

Main Unit

Physical

Size: 272 mm X 212 mm X 60 mm (10.7 in x 8.3 in x 2.4 in)

Weight: 2.04 Kg (4.5 lbs.)

Sunlight readable VGA color display for any lighting conditions, resolution 640 pixels x 480 pixels

Screen size: 21.3 cm (8.4 in)

Temperature Range: Operating: -20 ° C to 40° C (4 ° F to 104 ° F); Storage: -30 ° C to 65° C (-22 ° F to 149 ° F)

Powered by Internal Battery (10-hour duration)

Data Storage: Built in 32 GB drive minimum

Data Retrieval: USB port or WiFi

Microsoft Windows® 10 Operating System

Probe

Sensor type: infrared (four orthogonal sensors)

Size: 130 mm x 30 mm (5.1 in x 1.2 in)

Weight (Probe): 5.2 kg (11.5 lbs.)

Cable length: 60 m or 100 m (200 ft or 332 ft)

Weight (60 m Cable): 3.3 kg (7.4 lbs.)

Weight (100 m Cable): 8 kg (17.6 lbs.)

Sensor operating temperature: up to 105 ° C (221 ° F)

Removable sensor head

Water resistant

Depth Measurement Unit

Type: Rotary Encoder

Resolution: 2.5 mm (0.1 in)

2. Термометрический дефектоскоп буронабивных свай ТДБС-МГ4 (СКБ «Стройприбор», Россия)



ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОСКОПОВ

Наименование характеристик	ТДБС-ИГ4
Цена, рублей (НДС не облагается)	385 000
Диапазон измерения температуры (исполнение I), °С	от 5 до 80
– для измерения температуры вечномёрзлых грунтов (исполнение II), °С	от -30 до 60
Погрешность измерения температуры, °С	± 1
Дискретность индикации температуры, °С	0,1
Диапазон измерения перемещения, м	от 0 до 48
Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения перемещения, м	± 0,1
Напряжение питания, В (2 элемента типа АА (LR6, FR6))	3(±0,5);1,2
Габаритные размеры термометрического зонда, мм	Ø36 x 150
Объем архивируемой информации	16 серий по 300 результатов измерений
Масса прибор, кг, не более	8,5

3. ТЕРМОСКАН (НПП «Интерприбор», Россия)

Технические характеристики



Диапазон измерения температуры, °С	0..80
Диапазон измерения перемещения, м	0..100
Абсолютная погрешность измерения температуры/перемещения, °С/мм	0,1
Дискретность измерения температуры/перемещения, °С/мм	1
Скорость измерения температурного профиля, мм/с	40-150
Диаметр исследуемых свай, м	от 0,3
Внутренний диаметр измерительных каналов, мм	50
Дисплей планшета	8"
Габаритные размеры, мм	
- планшета	210x125x10
- блока управления	195x230x140
- термозонда	Ø36x130
- транспортировочного бокса	560x460x480
Масса в сборе, кг	16,3

Приложение Б. Сводная таблица возможностей геофизических методов

Метод	Одиночные буронабивные сваи						«Стены в грунте» траншейного и свайного типа				Одиночные грунтоцементные сваи		Грунтоцементные массивы	Тампонаж заобделочного пространства		Грунтовый массив при щитовой проходке	Используемая геофизическая аппаратура	
	Глубина заложения	Дефект оголовка	Дефект в области нижнего торца сваи	Дефект ствола	Дефект защитного слоя	Дефект контактных условий	Глубина заложения	Дефект сечения	Дефект зоны стыка свай/захваток	Расхождение свай	Геометрические параметры ГЦС	Прочностные характеристики грунтоцемента	Качество закрепления грунтового массива	Дефект контактных условий «обделка-грунт»	Контроль состояния тампонажа	Наличие зон разуплотнения в грунтовом массиве	НАИМЕНОВАНИЕ	Разреш. способность, ед. длины
Поверхностный сейсмоакустический	да	косвенно	нет	да	нет	да	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Да	Нет	РЕТ «Спектр-3/4» ИДС-1/2 ПДС-МГ4 РИТ СИТ SIGMA-4	Первые метры	
Межскважинный ультразвуковой	в пределах области, ограниченной трубами доступа				нет	нет	В пределах области, ограниченной трубами доступа			В пределах области, ограниченной трубами доступа, при условии их близкого расположения		Нет	Да	Нет	Нет	МСНА СNUM СНАМР-Q	Сантиметры - десятки сантиметров	
Термометрический	в пределах области, ограниченной расположением труб доступа				да	нет	В пределах области, ограниченной расположением труб доступа			В настоящее время не применяется			Нет	Нет	Нет	ТИР ТДБС-МГ4 Термоскан	Десятки сантиметров – первые метры	
Скважинный сейсмоакустический каротаж	Да (параллельный сейсмический метод)	Нет			Нет	Нет	В пределах области, ограниченной расположением измерительной скважины			Да	Да	в пределах области, ограниченной расположением измерительной скважины	Нет	Нет	Нет	Источники ЭДИВ Pulse Датчики ПДС-21 Wellstreamer ЭЛЛИСС-3 и их зарубежные аналоги	Первые метры	
Межскважинные сейсмоакустические просвечивания	Нет				Нет	Нет	Да	Нет	Да	Да	Да	Да	Нет	Нет	Да		первые Метры – десятки метров	
Поверхностная георадиолокация	Нет				Нет	Нет	Нет	В верхней части сооружения	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Да	Да	ОКО-2/3 ЗОНД-12 Лоза-2Н и их зарубежные аналоги	Сантиметры – первые метры (в зависимости от выбранной антенны)	
Наземная сейсморазведка	Нет						Нет				Нет		Да	Нет	Нет	Да	Сейсмостанции Лаколлит, ТЭЛЛС, ЭЛИСС и зарубежные аналоги	Первые метры - десятки метров