
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
СТАНДАРТ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р _____

(первая
редакция)

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ И ТИПОВЫЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.
КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СКРЫТЫХ РАБОТ
ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ
ПОДЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Настоящий проект стандарта не подлежит применению до его утверждения

Москва
Российский институт стандартизации
202_

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Акционерным обществом «Мосинжпроект» (АО «Мосинжпроект»), НИИ оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова НИЦ «Строительство» (АО «НИЦ «Строительство»), Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова), Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Университет науки и технологии «МИСИС»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 400 «Производство работ в строительстве. Типовые технологические и организационные процессы»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от _____ № _____ -ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок – в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования – на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (www.rst.gov.ru)

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 202_
Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения.....	
2 Нормативные ссылки.....	
3 Термины и определения	
4 Выбор метода контроля качества скрытых работ	
5 Сейсмоакустические методы	
6 Георадарный метод.....	
7 Ультразвуковой метод	
8 Термометрический метод	
9 Скважинные сейсмоакустические методы	
10 Возможности и ограничения методов	
11 Оформление результатов испытаний	
Библиография	

Введение

Настоящий стандарт разработан в целях обеспечения соблюдения требований Федерального закона от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

Стандарт учитывает опыт регламентации применения геофизических методов неразрушающего контроля качества скрытых работ в России и за рубежом.

В разработке стандарта принимали участие: научные руководители работы: канд. техн. наук Конюхов Д.С., канд. физико-матем. наук Капустин В.В.; ответственные исполнители: канд. техн. наук Чуркин А.А., канд. техн. наук Гайсин Р.М., канд. техн. наук Набатов В.В., канд. техн. наук Николенко П.В., Потокина А.М., Рейсбих Я.А.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Строительные работы и типовые технологические процессы. Контроль качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве подземных объектов

Construction work and typical technological processes.
Quality control of hidden works by geophysical methods in the construction of
underground facilities

Дата введения –

1 Область применения

Настоящий стандарт предназначен для учета при проектировании и строительстве подземных сооружений и устанавливает правила проведения неразрушающего контроля качества скрытых работ геофизическими методами.

Настоящий стандарт устанавливает правила выбора геофизических методов для контроля и обследования подземных сооружений, требования к методике проведения испытаний, подготовительным работам, применяемой аппаратуре, обработке и интерпретации данных.

Настоящий стандарт распространяется на неразрушающий контроль качества железобетонных свайных фундаментов, траншейных «стен в грунте», «стен в грунте» из буросекущих и бурокасательных свай, фундаментных плит и обделки тоннелей, грунтоцементных свай и массивов.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие документы:

ГОСТ Р 12.3.053 Система стандартов безопасности труда. Строительство. Ограждения предохранительные временные. Общие технические условия

ГОСТ Р (1.13.465-1.397.22) Сваи буронабивные и «стены в грунте» траншейного и свайного типа. Межскважинный ультразвуковой метод контроля качества бетона

СП 45.13330.2017 «СНиП 3.02.01-87 Земляные сооружения, основания и фундаменты»

СП 49.13330.2010 «СНиП 12-03-2001 Безопасность труда в строительстве. Часть 1. Общие требования»

СП 120.13330.2022 Метрополитены

СП 248.1325800.2016 Сооружения подземные. Правила проектирования

Примечание – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов (сводов правил) в информационной системе общего пользования – на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный документ, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого документа с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого документа с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку. Сведения о действии сводов правил целесообразно проверить в Федеральном информационном фонде стандартов.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 сплошность бетона (сваи, стены в грунте, плиты, обделки): Характеристика материала, характеризующая однородность свойств бетона конструкции.

Примечание – Нарушение сплошности – сужение ствола сваи, наличие в материале сваи, стены в грунте, плиты или обделки пустот, каверн, трещин, включений инородного материала.

3.2 дефект: Отдельное несоответствие конструкции какому-либо параметру, установленному проектом или нормативным документом.

3.3 ударный источник: Молоток или иной инструмент, с известным весом и материалом бойка, используемый для возбуждения сигнала при сейсмоакустическом обследовании конструкции.

3.4 антенна (георадиолокация): Преобразователь электрического импульса в электромагнитную волну определенной центральной частоты (излучающая антенна); преобразователь принимаемого электромагнитного отклика среды в электрический импульс, передающийся на блок управления (приемная антенна).

3.5 полезный сигнал: Сигнал, содержащий информацию о контролируемом в ходе проведения испытаний параметре изучаемой среды.

3.6 помеха (шум): Изменение амплитуды зарегистрированного сигнала, которое не интерпретируется в качестве полезного сигнала.

3.7 акустическая аномалия: Значительное изменение амплитуды / частотного состава сигнала, которое не интерпретируется в качестве импульса, соответствующего отражению от структуры изучаемой среды (нижнего торца сваи или «стены в грунте», геологической границы, границы «обделка-грунт» и т.д.).

Примечание – Акустическая аномалия может свидетельствовать о наличии нарушения сплошности или заметной неоднородности.

3.8 ультразвуковая аномалия: Значительное локальное отклонение значений параметров ультразвукового сигнала от значений, принятых в качестве нормы для данной конструкции.

3.9 температурная аномалия: Значительное локальное отклонение значений температурного профиля от значений, принятых в качестве нормы для данной конструкции.

3.10 эффективный радиус буронабивной сваи (термометрический метод): Условная величина, расчетный показатель сплошности бетона сваи по данным термометрического метода.

Примечание – 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.

3.11 эффективный радиус грунтоцементной сваи (сейсмоакустический каротаж): Условная величина, расчетный показатель диаметра ГЦС по данным сейсмоакустического каротажа.

Примечание – 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.

3.12 время первого вступления: Время регистрации приемником полезного сигнала при работе по методикам межскважинного ультразвукового метода и межскважинного сейсмического просвечивания.

3.13 обработка данных: Совокупность процедур, направленных на повышение соотношения сигнал/помеха и подготовку данных к интерпретации.

3.14 **интерпретация данных:** Анализ данных с целью получения выводов о состоянии изучаемого подземного сооружения / грунтоцементного массива.

3.15 **трубы доступа:** Стальные или полимерные трубы, устанавливаемые в конструкцию или грунтоцементный массив для проведения испытаний.

3.16 **база измерения:** Расстояние между источником и приемником в процессе проведения испытаний по методикам межскважинного ультразвукового метода, сейсмического каротажа и межскважинного сейсмоакустического просвечивания.

3.17 **профиль измерений:** Совокупность сигналов или их параметров, зарегистрированных для одной пары труб доступа при различной глубине погружения датчиков.

3.18 **радарограмма/водопадная диаграмма:** Монтаж зарегистрированных вдоль профиля измерения сигналов в георадиолокации или ультразвуковом методе.

3.19 **ось синфазности:** Область на радарограмме /водопадной диаграмме, где импульсы отраженной или дифрагированной волн сдвинуты по времени не более, чем на $\frac{1}{4}$ видимого периода.

4 Выбор метода контроля качества скрытых работ

4.1 Рекомендуется назначать объем работ и приоритетные к использованию геофизические методы контроля качества конструкции на этапе проектирования в соответствии с положениями СП 45.13330.2017, СП 120.13330.2022, СП 248.1325800.2016.

4.2 Выбор геофизического метода для контроля качества скрытых работ осуществляется в соответствии с таблицей 4.1 исходя из возможностей методов при решении задач контроля качества конструкций. Подробная информация об ограничениях области применения методов содержится в разделе 10.

Таблица 4.1 – Сводная таблица возможностей геофизических методов при контроле качества скрытых работ [1]

Конструкция	Контролируемый параметр	Геофизические методы				Скважинные сейсмоакустические методы
		Сейсмоакустический метод	Георадарный метод	Ультразвуковой метод	Термометрический метод	
Свайный фундамент	Длина	да	нет	косвенно		параллельный сейсмический метод
	Сплошность бетона	да, за исключением дефекта в области нижнего торца сваи	нет	в пределах области, ограниченной расположением труб доступа		косвенно, при применении параллельного сейсмического метода

Окончание таблицы 4.1

Конструкция	Контролируемый параметр	Геофизические методы				
		Сейсмоакустический метод	Георадарный метод	Ультразвуковой метод	Термометрический метод	Скважинные сейсмоакустические методы
«Стена в грунте» траншейного и свайного типа	Глубина заложения	да	нет	косвенно		
	Дефект сечения	да	нет	в пределах области, ограниченной расположением труб доступа		
	Дефект зоны стыка свай/захваток	нет	нет	косвенно		нет
Фундаментные плиты, обделка тоннелей	Сплошность материала	да (импакт-эхо метод и метод анализа отклика)	да	нет	нет	нет
	Дефект контакта «конструкция-грунт» / состояние тампонажа заобделочного пространства	да (метод анализа отклика)	да	нет	нет	нет
Одиночная грунтоцементная свая	Геометрические параметры ГЦС	нет	нет	нет	нет	да
	Деформационно-прочностные характеристики материала	нет	нет	нет	нет	да
Грунтоцементный массив	Геометрические параметры массива	нет	нет	нет	нет	да (межскважинное сейсмоакустическое просвечивание)
	Деформационно-прочностные характеристики и материала	нет	нет	нет	нет	да

4.3 Все работы следует выполнять в соответствии с требованиями по безопасности и организации труда по СП 49.13330.2010, [2]. На выполнение работ в зонах действия опасных производственных факторов должен быть своевременно выдан наряд-допуск. Ограждение строительной площадки и проходы на нее должны быть выполнены в соответствии с требованиями СП 49.13330.2010, ГОСТ Р 12.3.053.

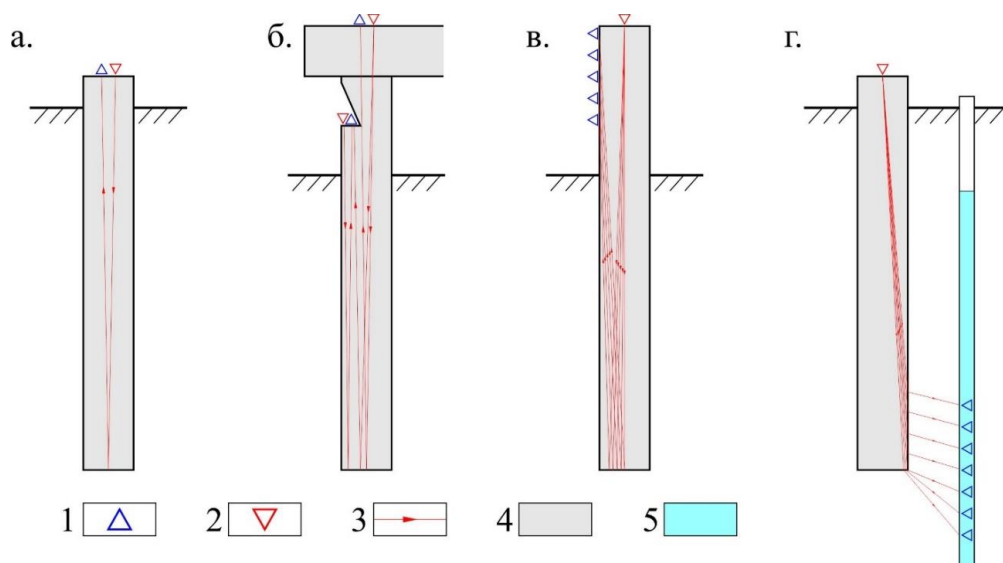
4.4 При выборе методики проведения контрольных работ должны быть обеспечены условия для выполнения исследований согласно рекомендациям разделов «Подготовка к проведению испытаний».

5 Сейсмоакустические методы

5.1 Контроль длины и сплошности свай

5.1.1 Методика проведения работ

5.1.1.1 Сейсмоакустический метод 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, а). Акустические волны регистрируются с помощью датчика, установленного на оголовке сваи.



а – стандартная; б – обследование сваи в составе ростверка; в – профилирование с общим пунктом возбуждения сигнала (ультрасейсмический метод); г – параллельный сейсмический метод; 1 – приемник; 2 – источник; 3 – лучевые траектории распространения упругих волн; 4 – железобетон; 5 – заполненная водой скважина

Рисунок 5.1 – Методики сейсмоакустического контроля длины и сплошности свайных фундаментов

5.1.1.2 При обследовании свай, включенных в состав ростверка или фундамент существующего здания, возможно использование методик с альтернативным взаимным расположением источников и приемников (рисунок 5.1, б–г).

5.1.1.3 Длина сваи или расстояние до значительного изменения ее импеданса при работе с данными во временной области (рисунок 5.2, б) определяется по формуле

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

где L – длина сваи / расстояние до источника акустической аномалии,

V – скорость стержневой волны в теле сваи,

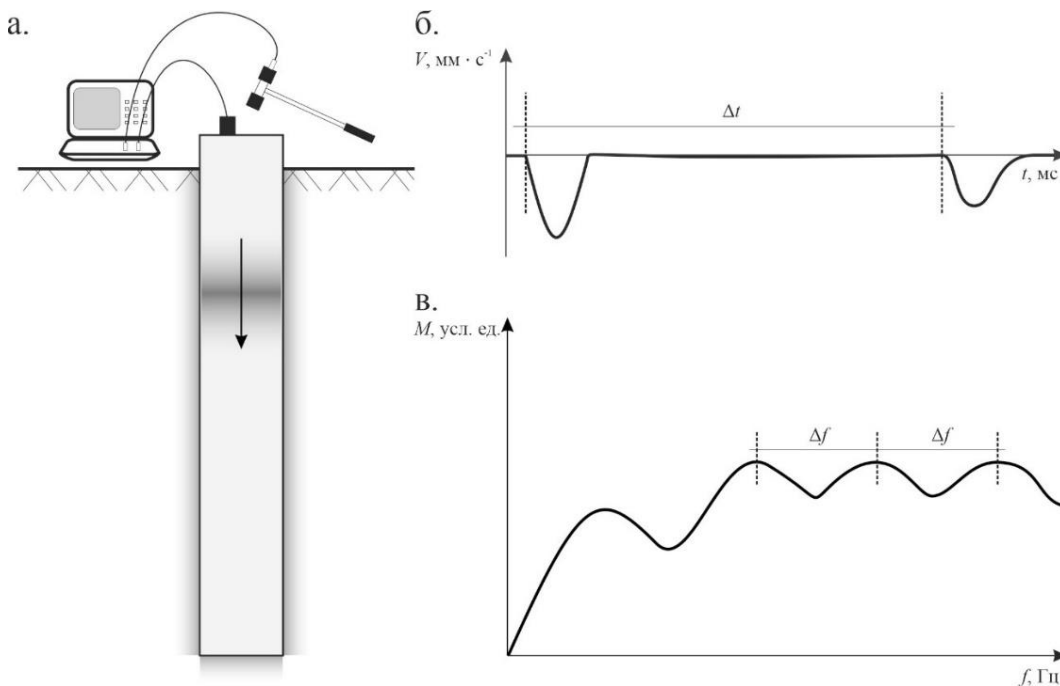
Δt – интервальное время пробега отраженной волны.

При наблюдении на спектре зарегистрированного сигнала ярко выраженных резонансных пиков (рисунок 5.2, в) возможно определение длины сваи или расстояния до значительного изменения ее импеданса по формуле

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

где Δf – расстояние между соседними резонансными пиками, Гц,

$n = 1, 2, 3 \dots$



а – проведение полевых испытаний; б – представление данных во временной области; в – представление данных в частотной области

Рисунок 5.2 – Методики анализа данных сейсмоакустического метода

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

5.1.1.5 Испытания следует проводить не ранее чем через 7 дней после окончания бетонирования/погружения сваи. В отдельных случаях, при соответствующем обосновании, допускается проводить испытания в более ранние сроки, установленные программой испытаний [3].

5.1.1.6 Датчик следует устанавливать на оголовки сваи на предварительно подготовленную площадку. Акустический контакт датчика с оголовком обеспечивается нанесением специальной мастики.

5.1.1.7 Датчик следует устанавливать на оголовки сваи таким образом, чтобы

измерительная ось его была параллельна оси сваи. Для каждой точки приема необходимо выбрать несколько точек возбуждения сигнала и с помощью ударного источника выполнить не менее 5 ударов (накоплений сигнала) по оголовку конструкции [1].

5.1.1.8 Рекомендуется использовать несколько ударных источников. Использование массивных ударников из резины (понижение центральной частоты ударного импульса) приводит к снижению разрешающей способности метода, но позволяет надежнее выделить отражение от нижнего конца сваи относительно помех. Использование легких ударников из твердого пластика и металла (повышение центральной частоты ударного импульса) приводит к повышению разрешающей способности метода, но может значительно уменьшить отношение сигнал/шум.

5.1.1.9 При обследовании сваи, включенной в ростверк или фундамент существующего здания желательна организация дополнительных точек возбуждения и приема сигнала относительно обследуемой сваи (рисунок 5.1, б) – на поверхности конструкции над геометрическим центром сечения сваи; на боковой поверхности сваи (при необходимости организуется шурф или раскоп). Целью использования нескольких способов расположения точек возбуждения и приема сигнала является получение данных, позволяющих выделить целевое отражение.

5.1.1.10 Параллельный сейсмический метод:

- Вблизи от конструкции бурят скважину, глубина которой превышает предполагаемую глубину заложения фундамента не менее чем на 3–4 м (рисунок 5.1, г). Скважина должна быть размещена на удалении не более 2,0 м от обследуемой сваи. В качестве обсадки допускается использование полимерных труб (диаметр обсадной трубы определяется исходя из габаритов скважинного зонда).

- Для регистрации сигналов могут применяться прижимные зонды с геофонами или зонды с гидрофонами (в этом случае скважина должна быть водонаполненной). Приемник перемещается с фиксированным шагом вдоль скважины, начиная с ее забоя. Рекомендуемый шаг между соседними положениями приемника – 10–25 см, но не более 0,5 м. Для каждого положения приемника регистрируется серия накоплений. Количество накоплений зависит от уровня помех и выбирается исходя из необходимости достижения соотношения сигнал/шум в четыре раза и более.

- На сейсмограммах выделяется годограф прямой волны, на котором по точке излома/резкого снижения кажущейся скорости отмечается подошва сооружения. Точность оценки глубины заложения фундамента параллельным методом

оценивается в $\pm 5\%$.

5.1.1.11 Профилирование с общим пунктом возбуждения / ультразвуковой метод:

- Для проведения испытания сваи с применением профилирования требуется доступ к участку боковой поверхности сваи протяженностью порядка 2–2,5 м (рисунок 5.1, в) с возможностью установки датчика в нескольких уровнях (желательна установка приемника не менее чем в пяти точках, расстояние между которыми составит 25–40 см).

- Положение источника остается неизменным, удар наносится по поверхности оголовка конструкции или по специально подготовленной площадке на боковой грани конструкции. Подготовленная площадка должна иметь достаточный размер для нанесения удара молотком и установки датчика, выполняющего роль синхронизатора момента удара. Для каждого положения приемника регистрируется серия накоплений. Количество накоплений зависит от уровня внешних помех и выбирается исходя из необходимости достижения соотношения сигнал/шум в четыре раза и более.

- На зарегистрированной сейсмограмме выделяются годографы прямой волны (распространяющейся от точки возбуждения сигнала до точки регистрации) и отраженной волны. По годографу прямой волны определяется скорость волны в теле сваи, по годографу отраженной волны – время прихода отражения от нижнего конца сваи или значительного изменения импеданса для использования формулы (5.1).

5.1.2 Подготовка к проведению испытаний

5.1.2.1 Количество свай в составе свайного фундамента, подлежащих контролю сейсмоакустическим методом, следует определять в соответствии с СП 45.13330.2017.

5.1.2.2 На оголовке обследуемой сваи должна быть подготовлена круглая площадка (диаметром до 10 см) для установки датчика, которая при необходимости должна быть выровнена перпендикулярно оси сваи с помощью угловой шлифовальной машины. Для свай диаметром более 500 мм датчик следует устанавливать не менее чем на трех площадках, распределенных по площади оголовка.

5.1.2.3 Перед проведением испытаний следует выполнить визуальный осмотр оголовка сваи. Рекомендуется зафиксировать фактические размеры оголовка; определить наличие и расположение арматурных выпусков, состояние бетона оголовка.

5.1.2.4 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.

5.1.3 Аппаратура

5.1.3.1 Комплект оборудования должен включать электронный блок и регистрирующий датчик, набор ударных источников, журнал проведения полевых работ в бумажном или электронном виде.

5.1.3.2 Сигналы регистрируют с помощью датчика, измеряющего ускорение или скорость смещения частиц оголовка сваи (акселерометра или велосиметра). При работах параллельным сейсмическим методом возможно использование скважинного приемника с геофоном, оснащенный прижимным устройством, или скважинного приемника с гидрофоном.

5.1.3.4 Сигналы, зарегистрированные датчиком, передаются на электронный блок. Оборудование должно позволять передавать данные на устройство постоянного хранения информации. Программное обеспечение оборудования должно иметь функцию экспорта зарегистрированных сигналов в распространенные форматы хранения текстовых (.txt, .csv, .xls) или геофизических (.segy и аналоги) данных.

5.1.3.5 Оборудование должно выполнять визуализацию зарегистрированных сигналов сразу после регистрации для возможности визуального контроля качества данных непосредственно в процессе проведения испытаний [3].

5.1.4 Обработка и интерпретация данных

5.1.4.1 Граф обработки зарегистрированных сигналов следующий [1].

- Сбор данных в один массив – для каждой испытанной сваи, каждого ударного источника сигналы собирают для совместной визуализации, контроля качества 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 возбужденного импульса.

- Фильтрация (частотная и пространственная, f-k) – 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 подавления случайных помех.

- Расчет 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 определения длины сваи и/или расстояния до акустической аномалии необходимо задать скорость распространения упругих волн в свае.

5.1.4.2 Скорость распространения упругих волн в свае предполагается постоянной и определяется одним из следующих способов:

- по измерениям на сваях с известной длиной;
- по результатам измерений по методике профилирования с общим пунктом возбуждения/ультрасейсмическим методом;
- по данным градуировочных зависимостей с учетом априорной информации.

Рекомендованные значения стержневой скорости распространения волн в бетоне составляют 3600–4400 м/с и зависят от класса прочности и возраста материала.

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

5.1.4.4 На полученных в результате обработки сигналах необходимо выделить отражения от нижнего конца сваи и нарушений сплошности бетона сваи (при наличии).

























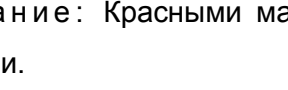
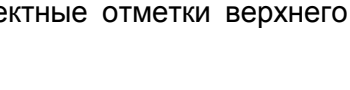
5.1.4.5 Интерпретацию данных следует выполнять в соответствии со следующими рекомендациями.

- Обработанные данные рекомендуется сопоставить с набором типовых сигналов для выделения характерных особенностей (рисунок 5.3). Сходство зарегистрированных данных с типовыми сигналами не должно использоваться в качестве единственного довода для вынесения заключения о сплошности сваи.

- Интерпретацию рекомендуется проводить с привлечением сигналов, собранных с применением различных ударных источников. В качестве оценки длины сваи допустимо принимать среднеарифметическое значение длины сваи, определенное с различными ударниками, либо выбирать данные, давшие

наименьшие расхождения с проектным значением.

- Изменения во вмещающих грунтах могут проявляться на зарегистрированных сигналах в виде акустических аномалий. Глубину выделенных акустических аномалий необходимо сопоставить с положением известных границ инженерно-геологических элементов.

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 нижней части	
	Свая проектной длины, с локальным снижением акустического импеданса в нижней части	
	Свая проектной длины, с локальным снижением акустического импеданса вблизи оголовка	
	Свая проектной длины, с нерегулярным профилем	

Примечание: Красными маркерами выделены проектные отметки верхнего и нижнего концов сваи.

Рисунок 5.3 – Типовые особенности сейсмоакустических сигналов.

5.2 Контроль качества плит и отделки тоннелей импакт-эхо методом

5.2.1 Методика проведения работ

5.2.1.1 Обследование фундаментных плит и отделки тоннелей с применением импакт-эхо метода (impact-echo testing) позволяет оценить интегральные характеристики отделки (толщина или скорость продольной волны в бетоне) и охарактеризовать состояние контакта «конструкция-грунт».

5.2.1.2 Импакт-эхо метод основан на явлении «толщинного» резонанса, заключающегося в образовании стоячих волн в отделке тоннеля в результате отражения волны от верхней и нижней поверхностей конструкции (рисунок 5.4). При помощи механического удара инициируются свободные затухающие колебания. Наблюдения за распространением продольных волн производится в диапазоне 1-60 кГц, что подходит для обнаружения неоднородностей размером вплоть до нескольких сантиметров.

5.2.1.3 Частоту f_{tr} , на которой наблюдается резонанс, можно определить по формуле

$$f_{tr} = \beta \frac{V_p}{2d}, \quad (5.3)$$

где V_p – скорость продольной волны в бетонной отделке или плите;

d – толщина плиты/отделки;

$\beta = 0,96$ – коэффициент для материала конструкции (железобетона).

5.2.1.4 При средней толщине отделки тоннелей d от 25 до 40 см резонанс будет наблюдаться в диапазоне 4000-8000 Гц. При выборе источника с центральной частотой импульса, близкой к указанному диапазону, резонанс будет наблюдаться в спектре отклика.

5.2.1.5 Сравнительное с другими точками наблюдения снижение частоты толщинного резонанса и появление высокочастотных шумов в спектре свидетельствует о наличии внутренних дефектов материала отделки и об ослаблении контактных условий с вмещающим грунтом.

5.2.1.6 Для возбуждения сигнала используются легкие (вес бойка менее 100 г) латунные и металлические молотки или специальные сферические ударники. Методика сбора данных предполагает мультипликативную обработку – с четырех взаимно противоположных сторон от точки регистрации сигнала на удалении не более 10 см наносится серия ударов.

5.2.1.7 В процессе работы ведется 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 прочее.

5.2.1.8 При использовании комплекта оборудования с двумя регистрирующими датчиками возможно получение оценки скорости продольных волн V_p для использования в формуле (5.3) по следующей схеме измерений [4]:

- регистрирующие каналы располагаются на расстоянии 30-50 см на фиксированной базе измерений;
- ударником производится серия накоплений на расстоянии порядка 15 см от первого из регистрирующих каналов, при этом точка удара располагается на одной оси с датчиками;
- по разнице времен прихода сигнала определяется интервальная скорость продольной волны, для каждой точки определения скорости производится два измерения с перпендикулярной ориентацией датчиков;

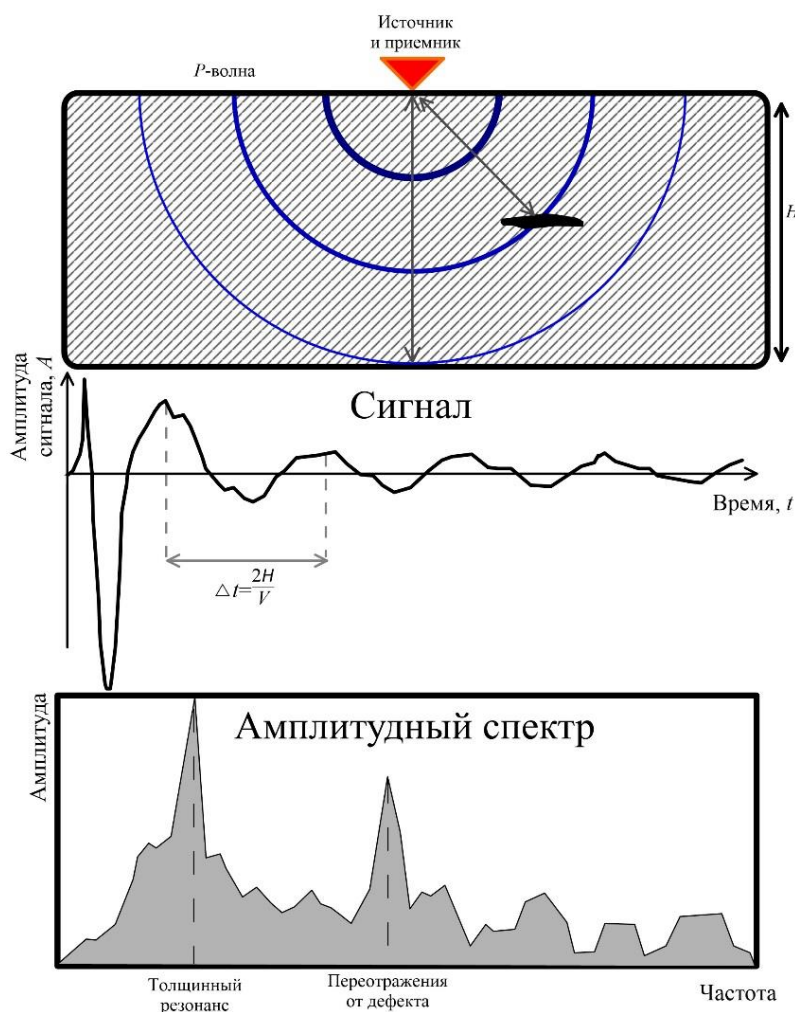


Рисунок 5.4 – Принципиальная схема импакт-эхо метода

5.2.2 Подготовка к проведению испытаний

5.2.2.1 Перед началом испытаний плиты или обделки выполняют визуальный осмотр объекта и сбор данных о его технологическом строении. По результатам анализа имеющейся информации составляется программа испытаний, содержащая общее описание объекта исследования; описание типа и особенностей конструкции; описание участка обследования с указанием направления обследования; предложения по расположению точек наблюдения.

5.2.2.2 Перед установкой датчика на точку наблюдения ее необходимо очистить от грунта, пыли, жидкости, льда и других посторонних материалов. Должен быть обеспечен хороший контакт датчика с поверхностью объекта исследования.

5.2.3 Аппаратура

5.2.3.1 Применяемое оборудование должно удовлетворять требованиям к аппаратуре указанным в 5.1.3.

5.2.3.2 Ударный элемент должен иметь сферическую форму или сферический наконечник. Он должен передавать достаточную энергию, для получения амплитудного спектра с одним преобладающим пиком. Продолжительность удара t_s должна быть меньше, чем ожидаемое время прохождения продольной волны туда и обратно, то есть: $t_s < \frac{2d}{\beta V_p}$ [4].

5.2.3.3 Для возможности работы импакт-методом регистрирующий датчик должен иметь частотную характеристику, позволяющую без потерь регистрировать колебания в диапазоне 3-20 кГц.

5.2.3.4 Желательна возможность определения резонансной частоты f_{tr} сигнала с последующей оценкой толщины плиты d / скорости продольной волны V_p в плите непосредственно в процессе проведения полевых работ для принятия решения о проведении дополнительных акустических наблюдений в точках с аномальным спектральным откликом.

5.2.4 Обработка и интерпретация данных

5.2.4.1 Граф обработки данных импакт-эхо метода:

- Просмотр полевых материалов и отбраковка некачественных данных.
- Предварительная обработка данных. Реализуется ряд процедур, призванных увеличить соотношение сигнал/шум (группировка сигналов, удаление постоянной составляющей);

- Мультипликативная обработка данных. Для подавления вторичных резонансных пиков и выделения основного резонанса применяется процедура мультипликативной обработки данных, заключающаяся в перемножении спектров сигналов, полученных для одной точки наблюдения с изменением взаимного положения источника и приемника;

- Построение карт атрибутов мультипликативных спектров сигнала: частоты толщинного резонанса f_{tr} ; толщины плиты d / скорости продольной волны V_p . В качестве вспомогательного инструмента возможно построение карт атрибутов добротности/Q-фактора сигнала и спектральных разрезов по отдельным профилям наблюдения или по всем точкам наблюдения.

5.2.4.2 Эмпирические критерии связи плановых размеров дефекта материала плиты или обделки, его глубины относительно дневной поверхности конструкции и поведения частотного отклика, приблизительно отражающие взаимодействие зоны Френеля зондирующего импульса с неоднородностью, схематически показаны на рисунке 5.5. Нарушение контакта «конструкция-грунт» приводит к сравнительному росту спектральной амплитуды отражения в точках регистрации отклика.

5.2.4.3 Интерпретация результатов носит качественный характер и заключается в разделении зон нормального и нарушенного состояния материала и локализации зон возможного нарушения контакта «конструкция-грунт». Основой сравнительной методики интерпретации допустимо принять отношение значения атрибута в данной точке к медианному значению атрибута для набора данных.

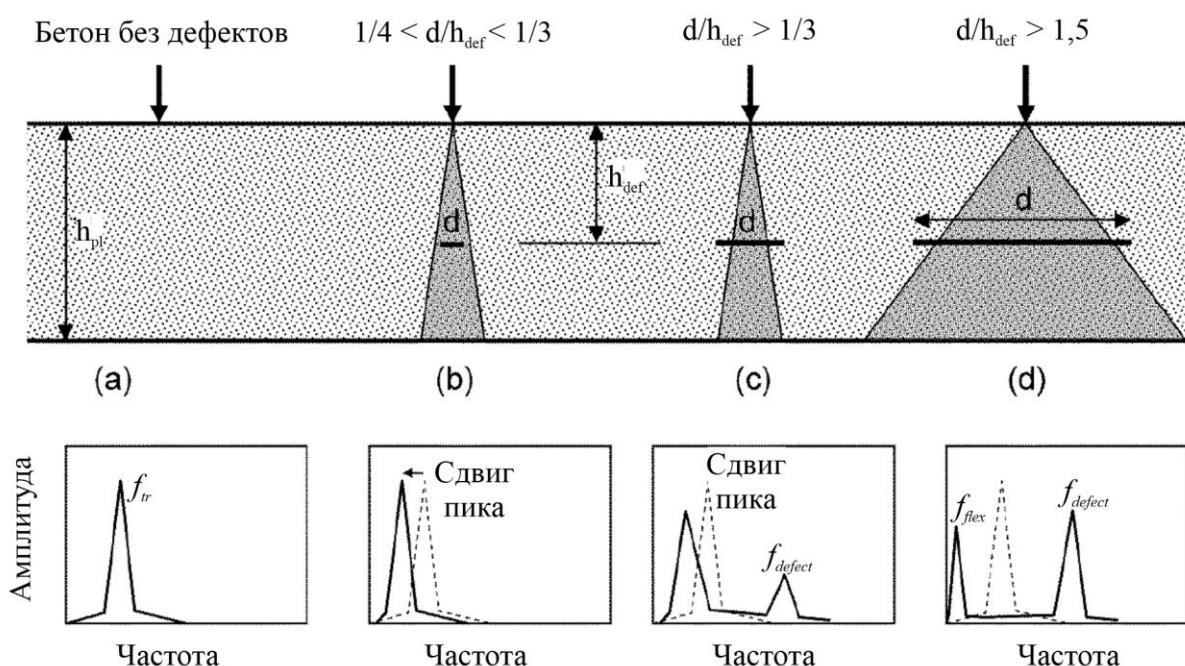


Рисунок 5.5 – Типовые особенности сейсмоакустических сигналов интерпретация

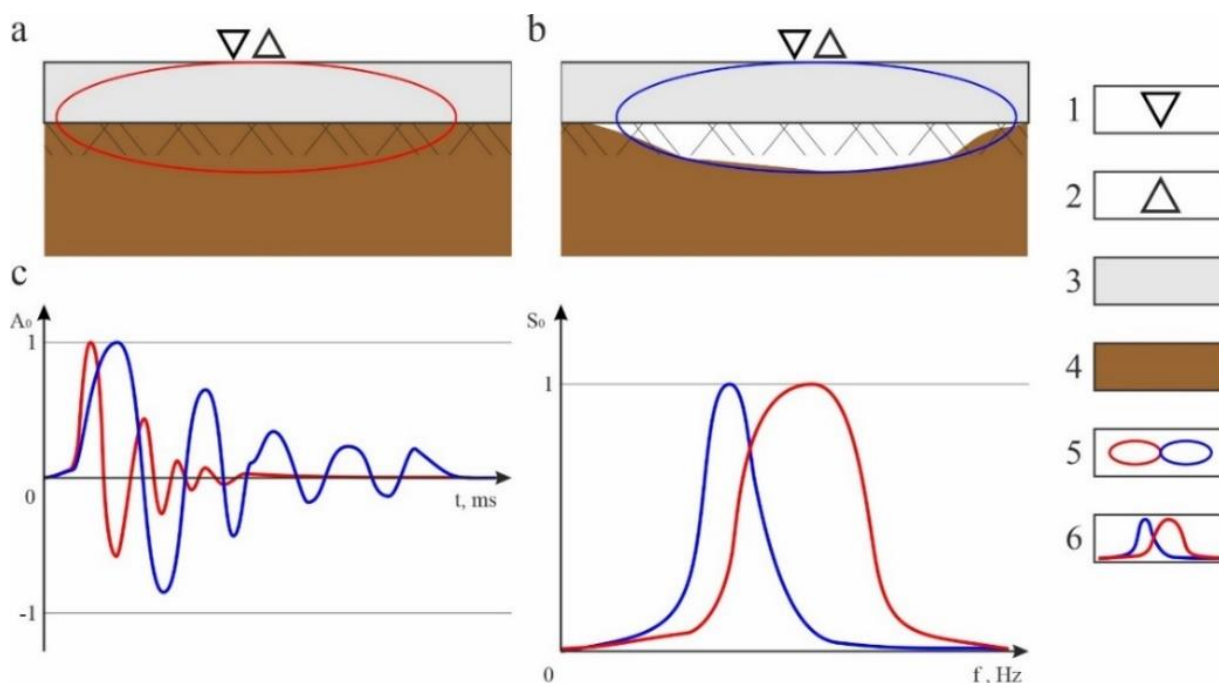
результатов использования импакт-эхо метода

5.3 Обследование плит и обделки тоннелей методом анализа отклика

5.3.1 Методика проведения работ

5.3.1.1 Метод анализа отклика (вибраакустический метод) применяется для обнаружения крупных нарушений контакта (от 1 м в плане и более). В основе метода лежит явление возникновения изгибных колебаний объема среды между дефектом и свободной поверхностью в ответ на импульсное воздействие.

5.3.1.2 Длительность и интенсивность акустического отклика, возникающего при возбуждении колебаний плитоподобной конструкции ударником, характеризует степень плотности контактного слоя. В случае нарушения контакта с грунтом (неудачного тампонирувания, пустот или ослабленных зон в грунтовой толще) наблюдается т.н. «звон» – заметный рост продолжительности и амплитуды основного цуга колебаний (рисунок 5.6).



а – хороший контакт; б – плохой контакт; с – вид отклика во временной и частотной областях; 1 – источник; 2 – приемник; 3 – железобетон; 4 – вмещающий грунт; 5 – объем среды, вовлеченный в колебания; 6 – идеализированный отклик

Рисунок 5.6 – Анализ поведения нормированного отклика

5.3.2.3 Обследование фундаментных плит ведется по сети наблюдений, расстояние между соседними точками в плане в которой не превышает 4 м. Оптимальным для решения задачи оценки контактных условий является шаг 2–4 м

между соседними точками акустических наблюдений.

5.3.2.3.1 Обследование тоннельной обделки ведется с шагом между сечениями, не превышающим 5 колец. Оптимальный шаг между соседними точками измерения вдоль оси обследуемого тоннеля составляет 1–3 колец. Точки возбуждения и регистрации данных равномерно распределяются по внутренней поверхности выбранного для обследования сегмента обделки.

5.3.2.3.2 В случае, если метод анализа отклика предполагается применить не для оценки контактных условий с грунтом, а для поиска неоднородностей бетона конструкции, обследование ведется по более плотной сети наблюдений. Шаг между соседними точками не должен превышать 2 м, общее количество точек наблюдения для обследуемой конструкции должно составить не менее 200 для получения статистически достоверной выборки атрибутов отклика.

5.3.2.4 Для возбуждения колебаний плит и обделки используются массивные (вес бойка более 400 г) резиновые киянки, металлические молотки и молотки из твердого пластика. Источник и приемник колебаний возможно устанавливать на сборной досылочной штанге, что позволяет обследовать все сечение тоннеля без использования специальных временных конструкций и лестниц.

5.3.2.4.1 В случае, если метод анализа отклика предполагается применить не для оценки контактных условий с грунтом, а для поиска неоднородностей бетона конструкции, для обследования возможно применить ударники с сравнительно меньшей массой бойка (от 200–300 г).

5.3.2.5 В каждой точке акустических наблюдений производится серия из не менее 4 ударов, результаты измерений усредняются. Удары производят в разных точках вблизи расположения приемного датчика, на удалении 10–30 см от точки его установки. Это позволяет при последующей обработке снизить влияние габаритных и структурных резонансов, возникающих в конструкции.

5.3.2.6 При использовании ударника без датчика силы работы возможно выполнить с применением методики анализа атрибутов нормированного сигнала. Атрибуты энергии нормированного сигнала E_n , площади нормированного спектра S_n и средневзвешенной частоты f_s позволяют характеризовать характер поглощения энергии колебаний и определяются согласно следующим формулам

$$E_n = \sum_0^T A_0(t) \cdot A_0(t), \quad (5.4)$$

$$S_n = \sum_i S_0(i) \cdot df, \quad (5.5)$$

$$f_s = \frac{\sum_i (S(i) \cdot f(i))}{\sum_i S(i)}, \quad (5.6)$$

где $A_0(t)$ – значение нормированного сигнала в момент времени t ,

$t = 0, \dots, T$, где T – длительность сигнала,

$df = \frac{\Delta f}{2^{(n-1)}}$, Δf – частота дискретизации,

n – количество отсчетов 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.

5.3.2.7 При использовании в качестве ударника молотка с датчиком силы возможно выполнение исследования по методике расчета кривой мобильности (mobility response testing) для каждой из точек обследования согласно [5]. В качестве параметра, характеризующего взаимодействие сваи с грунтом, используется т.н. мобильность $M(f)$ (mobility, «спектр механического адмиттанса»):

$$S(f) = M(f) \cdot F(f), \quad (5.7)$$

где $S(f)$ – спектр зарегистрированного сигнала,

$F(f)$ – спектр силовой характеристики ударного импульса, записанный датчиком, установленным на молотке.

5.3.2.8 Основные анализируемыми атрибутами для кривой мобильности являются [5]:

- среднее значение мобильности в частотном диапазоне 100-800 Гц M_{av} ;
- угол наклона кривой мобильности в полосе частот 0-40 Гц, т.н. «динамическая жесткость» K_d ;
- угол наклона линии тренда (линейной регрессии) для кривой мобильности в частотном диапазоне 100-800 Гц M_p/N ;
- отношение пикового значения кривой мобильности в полосе частот 0–100 Гц к M_{av} , т.н. «индекс пустот».

5.3.2 Подготовка к проведению испытаний

5.3.2.1 Требования по подготовке точек конструкции к проведению испытаний должны соответствовать положениям раздела 5.2.2.

5.3.3 Аппаратура

5.3.3.1 Основные требования к применяемой аппаратуре должны соответствовать положениям 5.1.3. Оборудование, применяемое для сейсмоакустического обследования свайных фундаментов и «стен в грунте», может

быть использовано для выполнения работ методом анализа отклика.

5.3.3.2 Для возможности визуального контроля качества зарегистрированных данных непосредственно в процессе проведения испытаний желательно наличие функции просмотра спектра регистрируемых сигналов.

5.3.4 Обработка и интерпретация данных

5.3.4.1 Граф обработки данных метода анализа отклика:

- Просмотр полевых материалов и отбраковка некачественных данных.
- Предварительная обработка данных. Реализуется ряд процедур, призванных улучшить качество данных и увеличить соотношение сигнал/шум (группировка сигналов, удаление постоянной составляющей, пространственная фильтрация, расчет и нормировка спектров для каждого сигнала).

- Построение карт атрибутов. В блок атрибутивного анализа могут входить следующие виды атрибутов: энергия сигнала; максимальное абсолютное значение амплитуды; добротность/Q-фактор; частота, соответствующая максимальной амплитуде (f_{Amax}).

5.3.4.2 В случае, если предполагается работа по методике анализа атрибутов нормированного отклика, основными расчетными параметрами являются энергия нормированного сигнала; площадь нормированного спектра; средневзвешенная частота. В случае, если предполагается работа по методике анализа кривой мобильности, рассчитываются описанные в 5.3.2.8 параметры.

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

5.3.4.3 При работе методом анализа нормированного отклика 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:

$$E_{na} < E_{nb}, S_{na} > S_{nb}, f_{sa} > f_{sb}. \quad (5.8)$$

где a – хороший,

b – плохой контакт соответственно.

5.3.4.4 По анализу атрибутов кривой мобильности следует учитывать общие соображения об их связи с параметрами системы «конструкция-грунт»:

- 1) среднее значение мобильности M_{av} в большей степени связано с присутствием внутренних дефектов в материале конструкции согласно [5];
- 2) «динамическая жесткость» K_d чувствительна к свойствам материала конструкции (прочность, толщина);
- 3) угол наклона линии тренда M_p/N чувствителен к участкам неоднородной структуры бетона конструкции;
- 4) «индекс пустот» чувствителен к возможным нарушениям контакта конструкции с грунтом.

5.3.4.5 Можно предложить следующую адаптацию правила «трех сигма» для выделения аномальных точек наблюдения с возможным нарушением контактных условий. Критерий определяется как соотношение значения атрибута и медианного значения в сравнении с стандартным отклонением σ . Например, для атрибута энергии сигнала предлагается следующий «эмпирический критерий»:

1. $E_i \leq E_m + \sigma$ – плотный контакт;
2. $E_m + \sigma < E_i \leq E_m + 2 \times \sigma$ – частичный (ослабленный) контакт;
3. $E_m + 2 \times \sigma < E_i$ – нарушенный контакт.

5.3.4.6 Помимо относительного статистического критерия, важное значение имеет стабильность поведения атрибутов отклика. Если абсолютное значение рассчитанного атрибута отклика превышает медианные значения по выборке в 2–3 раза, данные по точке наблюдения необходимо проанализировать во временной и частотной областях «вручную».

6 Георадарный метод

6.1 Обследование плит и обделки тоннелей

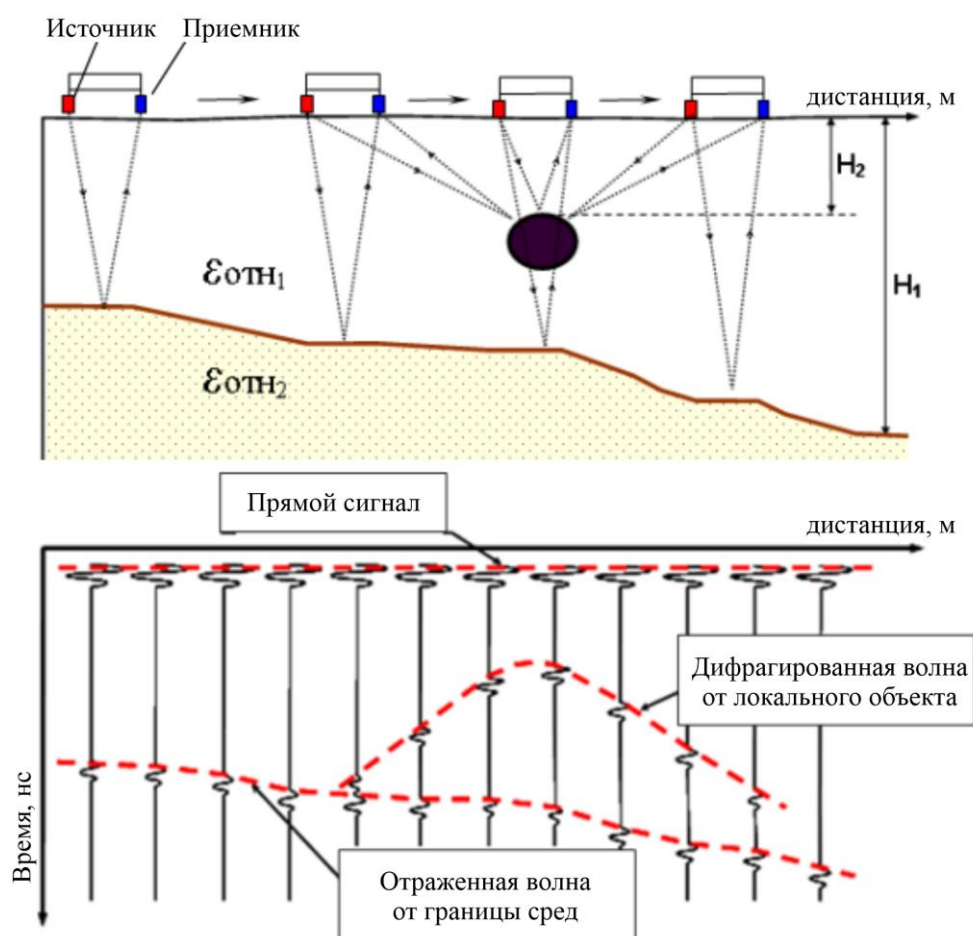
6.1.1 Методика проведения работ

6.1.1.1 Георадарное профилирование позволяет определить наличие дефектов в бетоне, обводненных участков, оценить состояние контакта «конструкция-грунт», проверить наличие и геометрию армирования, локализовать области дополнительного армирования или участки коррозии арматуры. Обследование, как правило, ведется по поверхности плиты или обделки.

6.1.1.2 Метод заключается в передаче в объект контроля с помощью излучающей антенны электромагнитного импульса с последующей регистрацией

откликов с помощью приемной антенны. Множество трасс располагают друг за другом, их амплитудные значения кодируются цветом. Так формируются радарограммы отдельных профилей наблюдения.

6.1.1.3 Полезным сигналом в георадиолокации в большинстве случаев является сигнал, отраженный от границы слоев с разными электрофизическими свойствами. Помимо прослеживаемых отраженных границ анализируются регистрируемые дифрагированные волны, даются предположения о природе источников дифракции (рисунок 6.1).



H_1 – глубина до отражающей границы; H_2 – глубина до источника дифрагированных волн; $\epsilon_{отн1}$ – диэлектрическая проницаемость верхнего слоя; $\epsilon_{отн2}$ – диэлектрическая проницаемость нижнего слоя

Рисунок 6.1 – Схема образования дифрагированной и отраженной волн

6.1.1.4 В георадиолокации различают горизонтальную и вертикальную разрешающие способности. Разрешающую способность по вертикали (глубине) определяют как минимальное расстояние между отражающими поверхностями, при котором их можно наблюдать как две отражающие границы, и составляет не менее $\frac{1}{4}$

длины волны λ . 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: $\Delta L \geq \sqrt{2\lambda h}$.

6.1.1.5 Центральная частота антенны должна выбираться исходя из требуемой по условиям Технического задания глубинности (толщины обделки и предполагаемой мощности зоны цементации), разрешающей способности или размеров обследуемого объекта, шага армирования (при определенных условиях затрудняющего проведение измерений с низкочастотными антеннами), и поставленной задачи (необходимости детального определения состояния арматуры или поиска зон нарушения сплошности материала обделки).

6.1.1.6 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 исходя из аппаратных особенностей применяемого георадара и с учетом необходимости снижения числа накоплений одновременно с сохранением высокого соотношения сигнал/помеха.

6.1.1.7 При картировании протяженных границ (граница «конструкция-грунт» или «тампонаж-грунт») профили прокладываются от скважины или шурфа в направлении другой скважины или шурфа или иных опорных пунктов определения параметров исследуемого разреза. При поиске и картировании протяженных объектов, длина которых много больше поперечных размеров, профили располагаются перпендикулярно объекту.

6.1.1.8 При поиске и картировании изометричных в плане локальных объектов проектируется 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» зону. Такими аномальными зонами могут быть зоны нарушенного состояния бетона конструкции – материала с повышенной влажностью, трещиноватостью.

6.1.2 Подготовка к проведению испытаний

6.1.2.1 Перед началом испытаний конструкции проводятся визуальный осмотр объекта и сбор данных о его технологическом строении и окружающем конструкцию 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 профилей наблюдения и применяемым антеннам.

6.1.2.2 Распределение профилей наблюдения вкрест сечения тоннеля выбирается исходя из возможности для перемещения антенного блока георадара вдоль обследуемой конструкции. При включении в зону обследования верхней части тоннелей требуется применение антенны, оснащенной досылочной штангой, или использование передвижных лесов или подъемников.

6.1.2.3 При проектировании измерительной сети (расстояния между профилями, расстояния между трассами на профиле) возможно ориентироваться на размеры первой зоны Френеля для целевой глубины (п. 6.1.1.4). В этом случае расстояние между профилями выбирается таким образом, чтобы первые зоны Френеля на целевой глубине пересекались не более чем на 50 % (по площади). Расстояние между трассами на профиле выбирается из расчета пересечения первых зон Френеля не более чем на 80–90 %.

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

6.1.2.5 При обследовании обделки тоннелей возможно проведение измерений в непосредственной близости от проходческого щита. Минимальное расстояние между щитом и оборудованием выбирается исходя из диаграммы направленности антенного блока (для минимизации влияния щита на регистрируемые данные).

6.1.3 Аппаратура

6.1.3.1 Георадар состоит из устройства синхронизации, блока питания, генератора сигналов, антенны (одной или нескольких), аналого-цифровой преобразователь и устройства управления, регистрации и визуализации принятых сигналов.

6.1.3.2 Выбор используемого антенного блока зависит от требуемых глубинности и разрешающей способности и должен осуществляться согласно рекомендательной таблице (таблица 6.1) с учетом снижения реальной глубинности измерений относительно рекомендуемых производителем значений. Для обследования обделок тоннелей и заобделочного пространства можно использовать практически любые георадары с высокочастотными антенными блоками (700 МГц и более).

6.1.3.3 Антенный блок георадара должен быть оснащен датчиком перемещения, позволяющим осуществить точную привязку профилей измерения к участку обследования.

6.1.3.4 Желательно наличие возможности обработки записанных радарограмм в режиме реального времени. Работа в условиях высокого уровня внешних шумов требует возможности анализа данных в поле для своевременного внесения исправлений в параметры регистрации сигналов (развертка, усиление, количество накоплений).

6.1.3.5 В состав электронного блока управления, регистрации и визуализации должны входить цифровой компьютер или микропроцессорное устройство, графический дисплей, устройство для хранения результатов измерений. Оборудование должно позволять передавать зарегистрированные данные на устройство постоянного хранения информации. Программное обеспечение оборудования должно иметь функцию экспорта зарегистрированных сигналов в популярные форматы хранения данных текстовых (.txt, .csv, .xls) или геофизических (.segy и аналоги).

Таблица 6.1 – Оценка глубины георадарного зондирования для различных частот антенных блоков [1]

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

6.1.4 Обработка и интерпретация данных

6.1.4.1 Граф обработки данных георадиолокационного профилирования включает следующие процедуры:

- коррекция шкалы времен, длины профиля;
- задание параметров визуализации данных (подбор цветовой схемы кодирования уровней амплитуд),
- задание параметров регулировки усиления (для получения записи, контрастной по всей временной развертке);
- вычитание среднего (используется для удаления возможной синфазной

помехи, а также сигнала прямого прохождения);

- полосовая фильтрация (улучшение соотношения сигнал-шум);

- дополнительные процедуры обработки сигналов: подбор профиля усиления, преобразование Гильберта, различные виды фильтрации в скользящих окнах (нерезкое маскирование, сглаживание средним).

6.1.4.2 Для получения информации о глубине положения границ и/или объектов, необходимо правильно определить скорость распространения электромагнитных волн в исследуемой среде. Это возможно сделать с использованием нескольких подходов: определение значений диэлектрической проницаемости материала по табличным данным; определение скорости волны в среде по гиперболам дифракции от объектов с известной глубиной залегания; георадиолокационные зондирования с изменением расстояния между источником и приемником.

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

6.1.4.3 С целью упрощения интерпретации данных допустимо использование атрибутивного анализа для выделения аномальных участков повышенной влажности, областей разуплотнения, пустот под бетонными покрытиями. Помимо стандартных атрибутов энергии сигнала во временной и частотной области, площади спектра, добротности, частоты максимума спектра и средневзвешенной частоты, для интерпретации данных георадиолокационного профилирования может быть рассчитан атрибут взаимной корреляции ансамблей соседних трасс. Атрибуты определяются внутри заданного временного интервала Δt , привязанного к пропикированной отражающей границе, либо определяются в скользящем окне заданного размера.

6.1.4.4 Задача интерпретации результатов георадиолокационного профилирования состоит в выявлении областей неплотного контакта между «грунт-обделка», получении сведений о состоянии армирования конструкций и наличии внутренних неоднородностей материала. На радарограммах выделяется ось синфазности, которая соответствует границе между конструкцией и грунтом, а также выделяются гиперболы дифракции, соответствующие арматурной сетке.

6.1.4.5 Характерными показателями неплотного контакта «конструкция-грунт»

являются следующие особенности волнового поля:

- существенные изменения амплитуд сигнала на оси синфазности, соответствующей контакту «конструкция-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.

7 Ультразвуковой метод

7.1 Контроль сплошности бетона свай и стен в грунте

7.1.1 Методика проведения работ

7.1.1.1 Контроль сплошности бетона свай и стен в грунте ультразвуковым методом основан на анализе параметров ультразвуковых волн, получаемых при проведении измерений через предварительно установленные в теле конструкции трубы доступа. Основным диагностический параметр – изменение времени первого вступления сигнала / скорости распространения сигнала, вспомогательный – затухание сигнала.

7.1.1.2 Для проведения измерений источник и приемник синхронно перемещают по трубам доступа и с заданным шагом производят возбуждение и регистрацию ультразвуковых сигналов (рисунок 7.1). Зарегистрированные сигналы передают на персональный компьютер для дальнейшей визуализации, обработки и интерпретации.

7.1.1.3 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 [6].

7.1.1.4 Испытания следует проводить не ранее чем через семь дней после окончания бетонирования сваи. В отдельных случаях допускается проводить испытания в сроки, установленные программой испытаний.

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

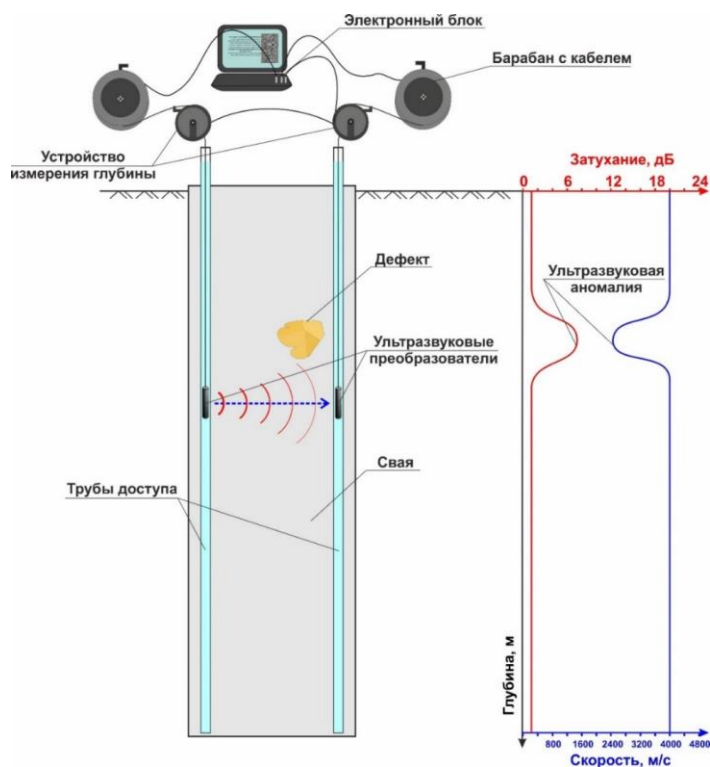


Рисунок 7.1 – Схема проведения испытаний свай ультразвуковым методом

7.1.1.6 Шаг записи (регистрации) ультразвуковых сигналов не должен превышать 250 мм. Рекомендованное значение шага записи – 50 мм.

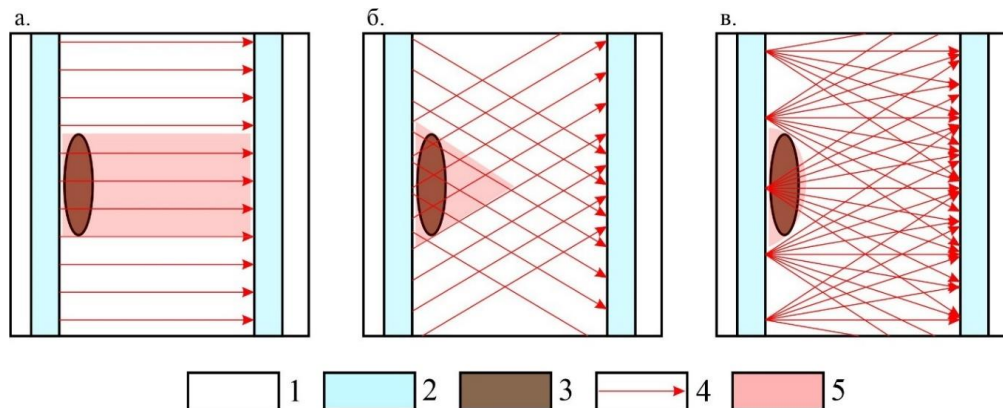
7.1.1.7 Детали проведения полевых измерений регламентируются по ГОСТ Р (1.13.465-1.397.22)

7.1.1.8 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.

7.7.1.9 При обнаружении на профиле зон с аномальным снижением скорости и роста затухания необходимо выполнить дополнительные измерения по методике косых прозвучиваний (рисунок 7.2, б) или по методике томографической съемки (рисунок 7.2, в) для локализации аномальной зоны в пределах изучаемого сечения сваи.

7.7.1.10 Каждый зарегистрированный ультразвуковой сигнал должен быть снабжен данными о глубине погружения ультразвуковых преобразователей, о базе измерений, а также идентификатором испытываемой сваи, пары труб доступа; отметками даты и времени. В процессе испытаний необходимо вести Журнал проведения испытаний, содержащий информацию о названии объекта;

идентификаторе (номере) испытываемой сваи; дате и времени проведения испытаний; схеме взаимного расположения, длине, материале и внутреннем диаметре труб доступа; базе измерений для всех пар труб доступа; превышении труб доступа относительно верха бетона сваи.



а – параллельных прозвучиваний; б – дополнительной съемки по методике косых прозвучиваний; в – томографической съемки; 1 – бетон сваи; 2 – заполненные водой трубы доступа; 3 – дефект материала; 4 – лучевые траектории пробега волн; 5 – реконструируемый по результатам съемки размер дефекта
Рисунок 7.2 – Локализация аномальной зоны при использовании

7.1.2 Подготовка к проведению испытаний

7.1.2.1 Для проведения испытаний в процессе изготовления конструкции 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 – 55 мм.

7.1.2.2 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.

7.1.2.3 В испытываемую сваю рекомендуется устанавливать по одной трубе доступа на каждые 250–300 мм диаметра сваи, но не менее 3 шт. Трубы доступа должны быть равномерно распределены по всему периметру сваи и разнесены на одинаковое расстояние от ее центральной оси. Увеличение числа труб доступа непосредственно влияет на достоверность локализации дефекта в теле конструкции (рисунки 7.3, 7.4).

7.1.2.3 Рекомендуемые схемы взаимного расположения труб доступа и

профилей наблюдения для «стен в грунте» представлены на рисунках 7.3, 7.4. Трубы доступа должны располагаться в пределах сечения таким образом, чтобы база измерений для профиля наблюдений не превышала 1,5–2,0 м. Расположение труб доступа при исследовании траншей стена в грунте (ТСГ) и свайной стены в грунте (ССГ) следует выбирать таким образом, чтобы существовала возможность выполнения измерений для проверки состояния зоны стыка между соседними элементами.

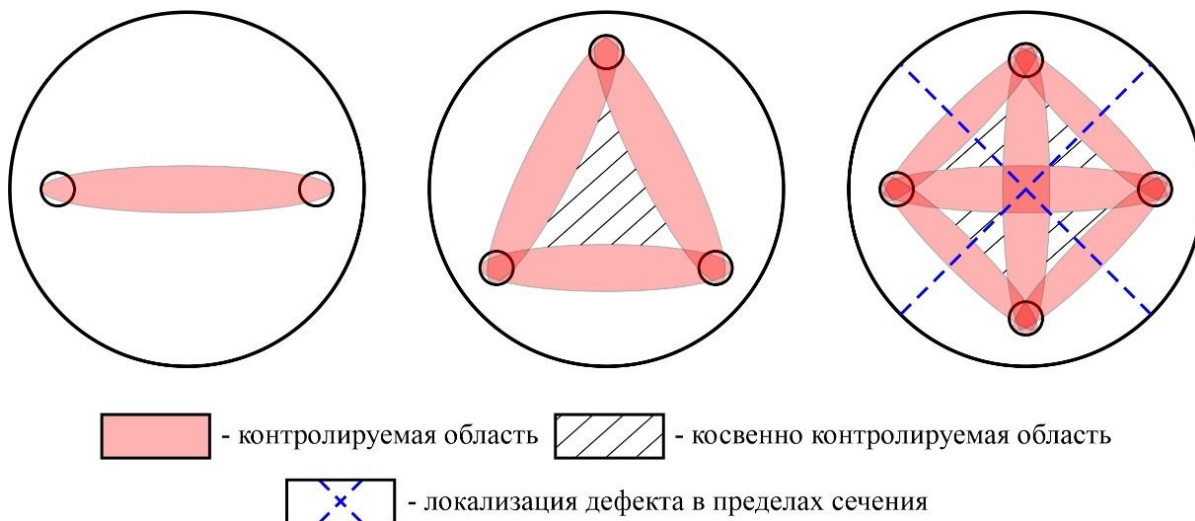


Рисунок 7.3 – Иллюстрация увеличения контролируемого объема с ростом числа труб доступа

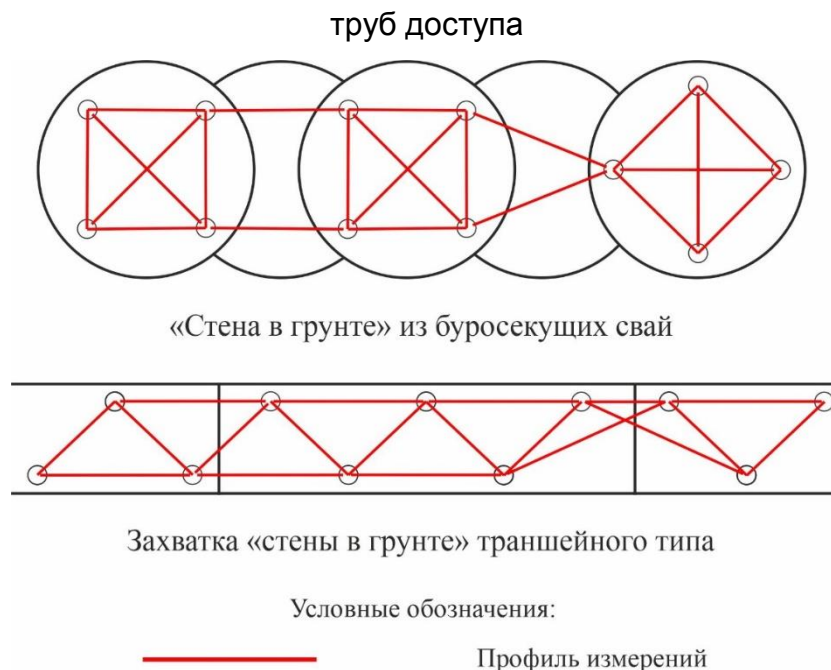


Рисунок 7.4 – Рекомендованная схема расположения труб доступа и профилей измерений при планировании ультразвукового контроля качества стены в грунте

7.1.2.4 Подготовка труб доступа осуществляется согласно ГОСТ Р (1.13.465-

1.397.22) Трубы должны быть ровные, недеформированные и достаточно прочные, чтобы сохранять свою форму при перевозке, монтаже и бетонировании сваи. 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.

7.1.2.5 Трубы доступа должны быть надежно 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.

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

7.1.2.7 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.

7.1.2.8 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.

7.1.3 Аппаратура

7.1.3.1 Комплект оборудования для проведения контроля сплошности свай и «стен в грунте» ультразвуковым методом должен включать ультразвуковые преобразователи (приемник, 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.

7.1.3.2 При отсутствии в комплекте оборудования энкодеров или выявлении проблем с их работоспособностью регистрация глубины погружения ультразвуковых датчиков должна осуществляться с помощью разметки на кабелях для погружения преобразователей. Разметка наносится с шагом не более 250 мм и должна сохранять устойчивость к влаге и механическому воздействию на протяжении испытаний.

7.1.4 Обработка и интерпретация данных

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

7.1.4.2 Скорость V ультразвукового сигнала рассчитывается по формуле

$$V = L/t, \quad (7.1)$$

где L – база измерений;

t – время первого вступления ультразвукового сигнала.

7.1.4.3 Оценка затухания сигнала осуществляется по формуле

$$\gamma = -20 \cdot \lg E/E_0, \quad (7.2)$$

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.

7.1.4.4 В случае использования труб доступа с повышенным внутренним диаметром (> 55 мм), в рассчитываемую скорость ультразвукового сигнала вносится поправка за пробег волны внутри труб доступа по формуле

$$V = L/(t - 2(\frac{L_{\text{тр}}}{V_{\text{тр}}} + \frac{L_{\text{в}}}{V_{\text{в}}}), \quad (7.3)$$

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).

7.1.4.5 Согласно ГОСТ Р (1.13.465-1.397.22) в качестве нормальной (средней) скорости допускается принять медиану массива, состоящего из всех значений скорости, зарегистрированных на профиле измерений.

7.1.4.6 Результаты измерений следует представлять в виде графиков зависимости скорости распространения и затухания ультразвукового сигнала от глубины и в виде сейсмограммы (водопадной диаграммы, waterfall diagram). Анализ

сейсмограммы позволяет оперативно выделить изменения амплитуды и времени первого вступления зарегистрированных сигналов и оценить качество зарегистрированных данных [1].

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

7.1.4.8 Для определения сплошности бетона конструкции на каждом профиле измерений выделяют и анализируют локальные отклонения скорости распространения и затухания ультразвуковых волн от нормы.

7.1.4.9 Рекомендованные критерии выделения ультразвуковых аномалий по отклонению значений скорости распространения ультразвуковых волн от нормальной скорости и по значениям затухания ультразвуковых волн приведены на рисунке 7.5.

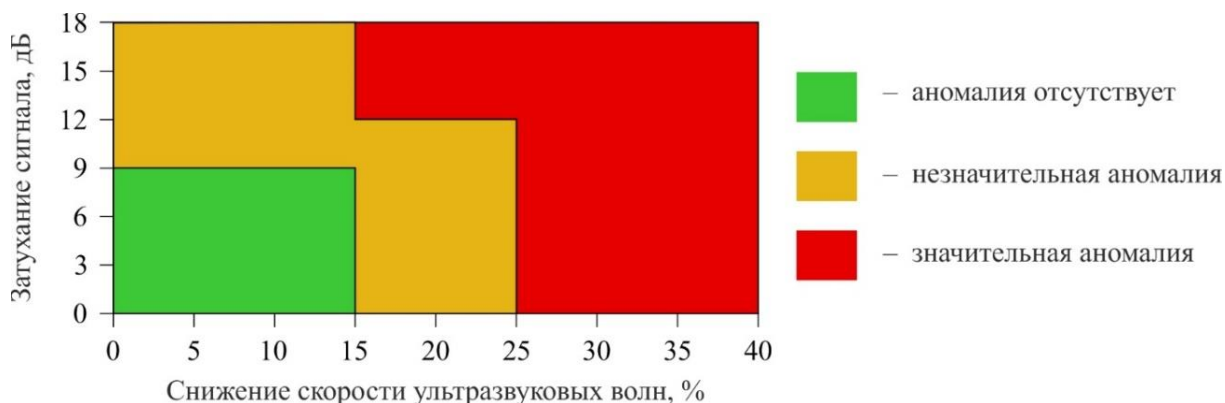


Рисунок 7.5 – Критерии выделения ультразвуковых аномалий

7.1.4.11 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.

7.1.4.12 При интерпретации данных рекомендуется учитывать справочные сведения о средних скоростях распространения ультразвуковых волн в бетоне в зависимости от класса и его возраста, а также результаты корреляционных зависимостей скорость-прочность, получаемых при испытании контрольных образцов применяемого материала.

7.1.4.13 Причины регистрации ультразвуковых аномалий, не связанных с

нарушением сплошности бетона конструкции, представлены в таблице 7.1.

Т а б л и ц а 7.1 – Ультразвуковые аномалии, не связанные с нарушением сплошности бетона

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

8 Термометрический метод

8.1 Контроль сплошности бетона свай и стен в грунте

8.1.1 Методика проведения работ

8.1.1.1 Неразрушающий контроль качества бетона свай и стен в грунте термометрическим методом основан на измерении температуры в процессе твердения бетона с целью получения сведений о сплошности бетона сваи. Измерения проводятся через установленные в составе арматурного каркаса конструкции трубы доступа с помощью термометрического зонда (рисунок 8.1) или с применением закладных кос температурных датчиков. Зарегистрированные температурные профили передаются на персональный компьютер для дальнейшей визуализации,

обработки и интерпретации.

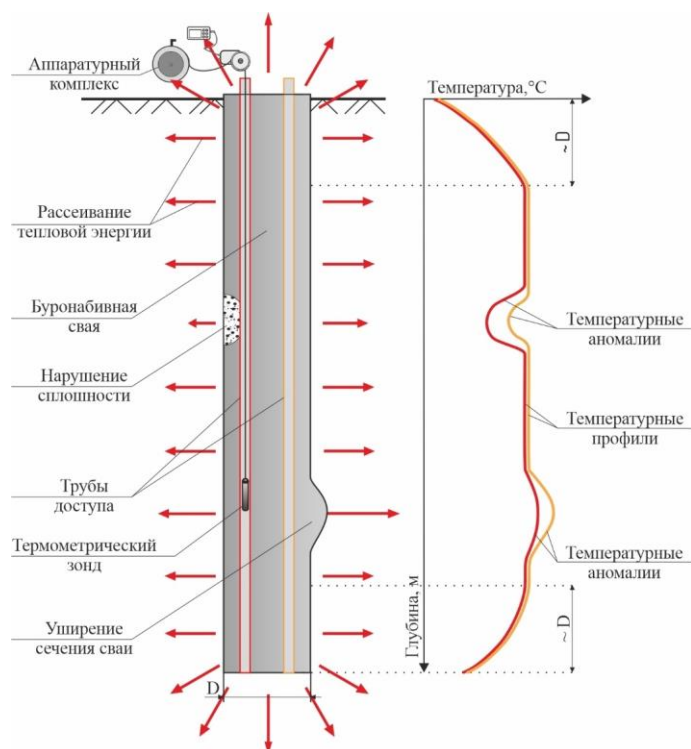


Рисунок 8.1– Схема проведения контроля сплошности бетона свай термометрическим методом

8.1.1.2 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 ч и не позднее 48 ч после окончания бетонирования сваи. Если используются добавки, замедляющие или ускоряющие сроки схватывания и твердения бетона, это необходимо учитывать при планировании сроков проведения испытаний [1].

8.1.1.3 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.

8.1.1.4 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 испытуемой свае [7].

8.1.1.5 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 испытуемой свае; к трубе доступа; к дате и времени.

8.1.1.6 В случае, 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.

8.1.1.7 В процессе проведения испытаний необходимо вести журнал проведения испытаний. Журнал проведения испытаний должен содержать название объекта; название фундамента; номер испытуемой 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.

8.1.2 Подготовка к проведению испытаний

8.1.2.1 Для проведения испытаний в процессе изготовления конструкции в составе арматурного каркаса должны быть установлены стальные или полимерные трубы доступа. Рекомендации к установке труб доступа должны соответствовать разделу 7.1.

8.1.2.2 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.

8.1.3 Аппаратура

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

8.1.3.2 Термометрический зонд должен быть оснащен 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 [7].

8.1.3.3 Глубина опускания термометрического зонда в трубу доступа должна регистрироваться устройством измерения перемещения. Пределы допускаемой 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 путем пропускания кабеля для погружения зонда через ведущий блок, который связан с угловым датчиком перемещения. Проскальзывание кабеля через блок не допускается.

8.1.3.4 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.

8.1.4 Обработка и интерпретация данных

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

8.1.4.2 Представление зарегистрированных данных для каждой сваи выполняют в виде температурных профилей (графиков изменения значений температуры в свае в зависимости от глубины) для каждой трубы доступа или косы температурных датчиков.

8.1.4.3 Для каждой сваи следует выполнить расчет 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.

8.1.4.4 В верхней и нижней частях сваи на участках длиной около 1 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 $T_{fit}(z)$

$$T_{fit}(z) = -\left(\frac{T_{max} - T_{min}}{2}\right) \operatorname{th}\left(\frac{z - z_0}{\alpha}\right) + \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2}\right), \quad (8.1)$$

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.

8.1.4.5 Поправка в зарегистрированные в верхней и нижней части сваи значения температуры вводится по формуле

$$T_{cor}(z) = \left(\frac{T_{measured}(z) - T_{min}}{T_{fit}(z) - T_{min}}\right) (T_{max} - T_{min}) + T_{min}, \quad (8.2)$$

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

8.1.4.6 Для пересчета зарегистрированных в свае значений температуры в значения эффективного радиуса используются два метода: пересчет на основании одной калибровочной точки или пересчет на основании нескольких калибровочных точек.

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

8.1.4.8 Граф интерпретации результатов термометрического метода:

- 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.

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

8.1.4.9 Контрастные изменения температуропроводности отдельных инженерно-геологических элементов 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.

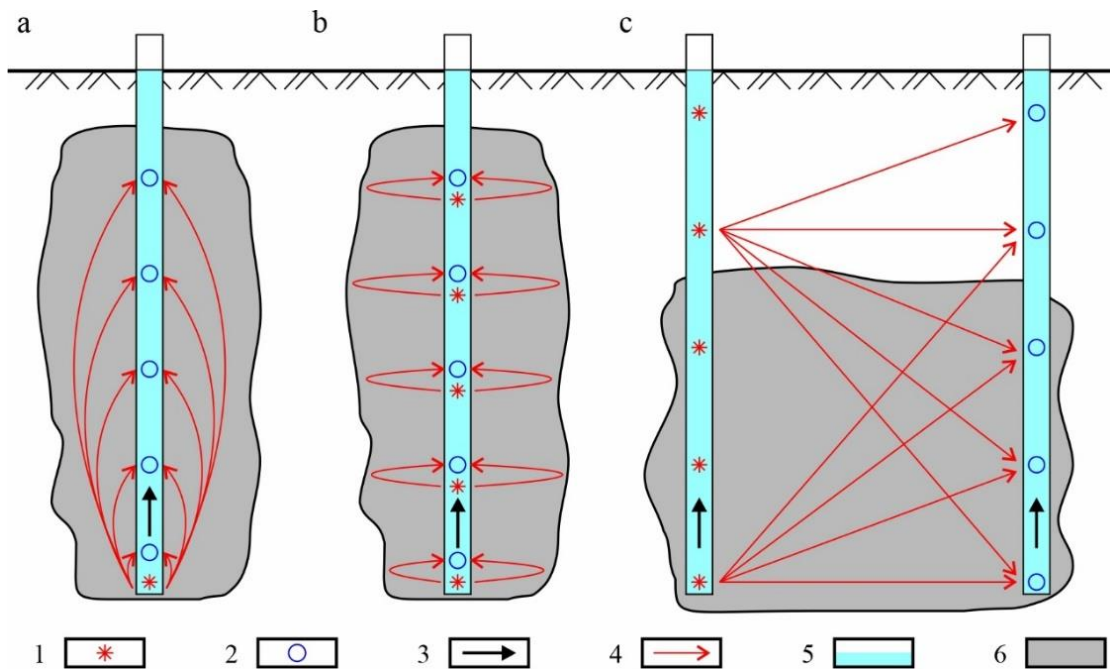
9 Скважинные сейсмоакустические методы

9.1 Контроль качества грунтоцементных свай

9.1.1 Методика проведения работ

9.1.1.1 Использование сейсмоакустического каротажа для обследования грунтоцементных свай и колонн (далее – ГЦС) состоит в возбуждении упругих волн в заполненной флюидом скважине в теле сваи и регистрации приемником колебаний волн разных типов, распространяющихся по жидкости, внутренней поверхности ствола скважины, телу сваи и окружающей сваю породе (рисунок 9.1). Скорости распространения этих волн, их динамические характеристики и спектральный состав несут информацию о геометрии и упругих параметрах тела сваи.

9.1.1.2 При создании импульсного избыточного давления в заполняющей скважину жидкости (с помощью источника упругих волн типа «спаркер») в теле грунтоцементной сваи возникает поле давления, состоящее из двух типов волн: объемной волны давления и гидроволны, связанной с наличием цилиндрической полости (рисунок 9.2).



a – потенциальный; *b* – дифференциальный каротажи; *c* – межскважинное просвечивание; 1 – источник колебаний; 2 – приемник колебаний; 3 – направление перемещения датчиков; 4 – траектории распространения упругих волн; 5 – скважина; 6 – грунтоцемент

Рисунок 9.1 – Системы наблюдений при сейсмоакустическом контроле качества грунтоцементных свай и массивов

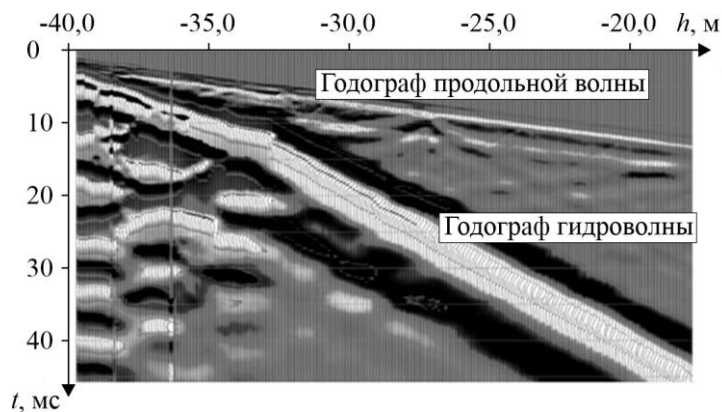


Рисунок 9.2 – Пример регистрации волновой картины с выраженными годографами продольной и гидроволн при сейсмоакустическом обследовании грунтоцементной сваи

9.1.1.3 По временам пробега волн при известном взаимном расположении источника и приемника колебаний и траекториях пробега волн рассчитываются интервальные скорости распространения продольной объемной волны V_p и гидроволны V_f . Скорость гидроволны определяется по формуле

$$V_r = V_0 / \sqrt{1 + \rho_0 V_0^2 / \mu}, \quad (9.1)$$

где ρ_0 – плотность жидкости;

V_0 – скорость звука в жидкости;

μ – модуль сдвига материала околоскважинного пространства.

Через определенное при анализе волновой картины значение V_r дается оценка скорости поперечных волн V_s с использованием формулы Уайта

$$V_s = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho} \frac{V_r^2 V_0^2}{V_0^2 - V_r^2}}, \quad (9.2)$$

где ρ – плотность материала грунтоцементной сваи (определяется по результатам лабораторных испытаний).

9.1.1.4 Переход от определенных 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.

9.1.1.5 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

$$D = V_p / 2F, \quad (9.3)$$

где F – частота минимума модуля спектра.

9.1.1.6 Контроль качества одиночной ГЦС выполняется в три этапа:

- В первом цикле наблюдений измерения выполняются по методике «потенциального каротажа» (рисунок 9.1, а). Один из датчиков (источник или приемник) располагается неподвижно на забое скважины, в то время как второй (приемник или источник, соответственно) перемещается по стволу скважины с заданным шагом, не превышающим 0,5 м, до устья скважины.

- Второй цикл наблюдений ведется по методике «дифференциального каротажа» (рисунок 9.1, б). Источник и приемник фиксируются на постоянной базе, не более 1,0 м, и совместно перемещаются снизу вверх по стволу скважины с шагом не более 0,5 м.

- Третий цикл наблюдений также ведется по методике «дифференциального

каротажа», на увеличенной до 2,0 м базе между источником и приемником. Шаг между точками наблюдения составляет не более 0,5 м.

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

9.1.2 Подготовка к проведению испытаний

9.1.2.1 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.

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

9.1.2.4 В случае, если при отборе керна из скважины будут выделены интервалы с включением неустойчивых грунтов, должно быть принято решение об обсадке скважины и продолжении исследований. В качестве обсадки скважины должны применяться полимерные трубы доступа. Диаметр обсадной трубы выбирается в зависимости от диаметра применяемого оборудования и диаметра скважины исходя из необходимости обеспечения плотного контакта трубы доступа и грунтоцементного массива.

9.1.3 Аппаратура

9.1.3.1 Аппаратурный комплекс для сейсмоакустического каротажа включает в себя систему для возбуждения (электроискровой источник, «спаркер») и регистрации (скважинный зонд) сигнала и блок регистрации данных (регистратор и персональный компьютер).

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

9.1.3.3 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.

9.1.3.4 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 приемно-регистрирующей аппаратурой.

9.1.3.5 Источником питания установки служит бытовая электросеть 220 В/50 Гц. Потребляемая мощность зависит от величины накопленной электрической энергии и 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.

9.1.3.6 Прием 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 пьезоприемники (гидрофоны). Зонд размещен на конце многожильного экранированного кабеля диаметром в 5–6 мм, соединяющего приемники с регистрирующей аппаратурой на поверхности.

9.1.3.6 Регистратор представляет собой цифровую систему сбора и хранения информации на базе любого стандартного аналого-цифрового преобразователя, аналогового усилителя, подключаемую к компьютеру.

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

9.1.4 Обработка и интерпретация данных

9.1.4.1 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 – объемных продольных волн и гидроволн. Определение интервальных скоростей распространения волн V_p и V_r . Фиксация глубин образования вторичных волн обоих типов на возможных неоднородностях сваи.

- Расчет скоростей распространения поперечных волн V_s по формуле (9.2). Построение скоростной модели разреза по значениям V_p и V_s .

- Расчет динамического модуля сдвига μ околоскважинного пространства по формуле (9.1). Расчет предела прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ с использованием корреляционных зависимостей.

- Спектральный анализ волн двух типов. Выбор окон расчета спектров продольной и гидроволны. Построение модулей спектров для двух типов волн вдоль

ствола скважины. Определение эффективного диаметра сваи по формуле (9.3).

9.1.4.2 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 (по 3 или 5 точкам измерения) от шага между положениями приемников до интервала исследований.

9.1.4.3 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.

9.1.4.3 Отклонения всех параметров более чем на два стандартных отклонения от медианных значений по стволу измерительной скважины трактуются как аномально-дефектные участки ГЦС.

9.2 Контроль качества грунтоцементных массивов

9.2.1 Методика проведения работ

9.2.1.1 Для оценки степени однородности и физико-механических характеристик грунтоцементного массива применяется методика межскважинного сейсмоакустического просвечивания (далее – МСП).

9.2.1.2 Методика предполагает размещение в двух скважинах, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, источников и приемников сейсмических волн. Производится последовательное возбуждение сигналов в одной скважине, прием и регистрация волн другой скважине. Образованные пары «источник – приемник» создают плотную сеть лучей, заполняющую пространство между скважинами (рисунок 9.1, с). Получаемые в результате записи позволяют узнать времена прихода сейсмических волн и определить их скорость для каждой пары «источник – приемник».

9.2.1.3 Просвечивание между скважинами осуществляется по схеме томографической съемки – для каждого положения точки возбуждения используются все положения точки приема.

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

9.2.1.4.1 Выбор начальной скоростной модели для инверсии данных сейсмотомографии возможно осуществлять по результатам параллельных прозвучиваний для данной пары скважин и с учетом априорной информации о

строении массива.

9.2.1.5 Возможно выполнение исследование не только на продольных, но и на поперечных волнах, с применением специализированных источников колебаний.

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

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

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

9.2.2 Подготовка к проведению испытаний

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

9.2.2.2 Количество и расположение контрольных скважин определяются требованиями организации, проводящей контроль качества изготовленного грунтоцементного массива.

9.2.2.3 Вопрос о выборе межскважинного расстояния требует особенного 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 %.

9.2.2.4 В случае использования скважинных источников поперечных волн выбор межскважинного расстояния определяется с учетом эффективной дальности возбуждения полезного сигнала для данного типа источника, определяемой по согласованию с производителем оборудования.

9.2.3 Аппаратура

Требования к аппаратуре для проведения сейсмоакустического каротажа указаны в разделе 9.1.

9.2.4 Обработка и интерпретация данных

9.2.4.1 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 приемников в двух скважинах в варианте 2D и всех, участвующих в обследовании грунтоцементного массива, в варианте 3D томографии;

- составление входных массивов для программы томографического обращения $\{X_i; Y_i; Z_i; X_n; Y_n; Z_n; t\}$ – координаты источника, координаты приемника и время пробега волны от источника к приемнику;

- составление матрицы начальной модели скоростного строения межскважинного пространства с использованием результатов потенциального каротажа для скважин, участвующих в просвечивании и результатов расчета средних скоростей распространения по лучам для равных глубин расположения источников и приемников;

- расчет двух- или трехмерной 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 ;

- расчет предела прочности на одноосное сжатие с использованием корреляционных зависимостей и пересчет разреза или куба скоростей в разрез или куб значений предела прочности на одноосное сжатие;

- анализ степени однородности грунтоцементного массива согласно статистическим и пространственным критериям.

9.2.4.2 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 медианного (на два и более стандартных отклонения); 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 медианного из определенных и от проектного значения.

- Третий этап состоит в привязке сейсмоакустических данных к данным лабораторных определений по кернам, извлеченным из измерительных скважин.

10 Возможности и ограничения методов

10.1 Сейсмоакустический метод контроля длины и сплошности свай:

10.1.1 Метод позволяет обнаружить и локализовать по глубине значительные неоднородности ствола сваи, резкие изменения поперечного сечения сваи, включения инородного материала в бетоне, составляющие не менее ± 25 % от площади сваи.

10.1.2 В случае повышенных значений акустической жесткости 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.

10.1.3 Метод испытаний в общем случае не позволяет контролировать длину и сплошность свай с ненормируемыми по размерам сечения и материалу характеристиками (свай-ПИТ; СФА-свай в неоднородных грунтах; грунтоцементных свай). Отдельные успешные результаты испытаний данных типов конструкций сейсмоакустическим методом не позволяют рекомендовать их сплошного контроля.

10.1.4 В большинстве случаев метод испытаний не позволяет определить сплошность сваи ниже первой значительной акустической аномалии.

10.1.5 Метод испытаний не позволяет обнаружить нарушения сплошности у нижнего конца сваи (на участке в пределах ~ 10 % от длины сваи).

10.1.6 Метод испытаний не позволяет определить геометрические размеры и физические свойства нарушений сплошности и сделать вывод о природе выявленных нарушений сплошности.

10.2 Ультразвуковой метод контроля сплошности свай и стен в грунте:

10.2.1 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.

10.2.2 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.

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

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

10.3 Термометрический метод контроля сплошности свай и стен в грунте:

10.3.1 Метод позволяет проводить контроль сплошности бетона и осуществлять приемку свай в минимальные сроки после ее 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.

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

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

10.4 Акустические и георадиолокационные методы обследования фундаментных плит и обделки тоннелей:

10.4.1 Результатом совместной интерпретации георадиолокационного профилирования и акустической съемки являются карты распределения различных динамических атрибутов сигнала с выделенными участками потенциального:

- дефектного материала конструкции;
- нарушения контакта «конструкция-грунт».

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

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

10.4.4 Метод анализа отклика/виброакустический метод в общем случае не позволяет определить нарушение контакта с грунтом для плитоподобных конструкций толщиной более 0,6 м.

10.5 Сейсмоакустические методы контроля грунтоцементной свай и массивов:

10.5.1 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 в случае определения скоростей продольных и гидро- волн;

- позволяет дать оценку эффективного диаметра конструкции с применением инструментов спектрального анализа;

10.5.2 Среднюю точность определения параметров исследуемой ГЦС по данным сейсмоакустического каротажа можно оценить в 10 %.

10.5.3 Метод не позволяет определять форму реального сечения сваи.

10.5.4 Метод требует подготовки свай для проведения испытаний – бурения измерительной скважины определенного диаметра глубиной более длины сваи и заполнения ее технической водой.

10.5.5 Сейсмоакустические методы исследования искусственно закрепленных массивов позволяют оценить качество закрепления грунтов грунтоцементными секущими сваями.

10.5.6 Качество грунтоцементного массива выражается в количественной мере предела прочности на одноосное сжатие в зависимости от координат произвольной точки в грунтоцементном массиве.

11 Оформление результатов испытаний

Технический отчет по результатам испытаний должен содержать:

- сведения об объекте испытаний (название; местоположение; краткое

описание объекта испытаний; информация об инженерно-геологических условиях).

- сведения об испытываемых конструкциях (идентификация испытываемых свай/захваток ТСГ/колец обделки/секций сооружения/наблюдательных скважин; информация из исполнительной или проектной документации о геометрических параметрах, материале, технологии изготовления; абсолютные или относительные отметки проведения испытаний; дата изготовления конструкции).

- сведения о применяемом оборудовании (краткое описание используемого комплекса; сертификаты соответствия или свидетельства о поверке/калибровке).

- сведения о методике выполненных испытаний (схема расположения точек/профилей наблюдения относительно обследуемых конструкций, сведения о параметрах возбуждения и регистрации сигналов);

- в отчет должна быть (дополнительно) включена информация о возможных источниках техногенных помех и других факторах, осложнивших проведение полевых изысканий.

- сведения об использованных процедурах обработки (в случае работ ультразвуковым методом сейсмограммы записанных профилей должны быть включены в отчет в качестве отдельного приложения).

- представление обработанных результатов испытаний.

- заключение о состоянии обследуемой конструкции.

- копия свидетельства о допуске лаборатории к работам в области инженерных изысканий.

Библиография

- [1] Руководство по контролю качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве подземных объектов, включая объекты метрополитена, на территории Москвы. Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы, 2021
- [2] СНиП 12-04-2002 Безопасность труда в строительстве. Часть 2. Строительное производство
- [3] ASTM D5882-16. Standard test method for low strain impact integrity testing of deep foundations, 2016
- [4] ASTM C1383-15. Standard test method for measuring the P-wave speed and the thickness of concrete plates using the impact-echo method, 2015
- [5] ASTM C1740-16 Standard practice for evaluating the condition of concrete plates using the impulse-response method
- [6] ASTM D6760–16. Standard test method for integrity testing of concrete deep foundations by ultrasonic crosshole testing, 2016
- [7] ASTM D7949-14. Standard test methods for thermal integrity profiling of concrete deep foundations, 2014

Ключевые слова: контроль качества скрытых работ, геофизические методы, сейсмоакустические методы, ультразвуковые методы, термометрический метод, метрополитен, подземный объект
