

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет»

*На правах рукописи*

Лосева Елизавета Сергеевна



ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ  
СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ

Специальность 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов,  
изделий, веществ и природной среды

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Сясько В.А.

Санкт-Петербург – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ УСТРОЙСТВА СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЭТОМ ДЕФЕКТОВ И МЕТОДОВ ИХ ВЫЯВЛЕНИЯ..	13
1.1 Анализ особенностей грунтов в Санкт - Петербурге.....	13
1.2 Свайные фундаменты и их дефекты в слабых водонасыщенных грунтах Санкт- Петербурга .....	16
1.2.1 Анализ применения свайных технологий.....	16
1.3 Дефекты, возникающие при устройстве свай .....	25
1.4 Изменения физико-механических характеристик бетонной смеси при твердении в грунте .....	30
1.5 Характеристика методов неразрушающего контроля и возможности их применения при устройстве свай в грунтах Санкт-Петербурга.....	35
1.6 Выводы по Главе 1 .....	44
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (ИСПЫТАНИЙ) ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ.....	46
2.1 Общие сведения.....	46
2.2. Теоретические основы метода применительно к рассматриваемой задаче .....	48
2.3 Модели искусственных дефектов железобетонных свайных фундаментов.....	51
2.4 Моделирование процесса формирования и распространения акустических колебаний и получения сигналов для свай с искусственными дефектами .....	54
2.4.1 Общие положения моделирования процесса формирования и распространения акустических колебаний и получения сигналов для свай, устанавливаемых в грунте.....	54

2.4.2 Моделирование процесса формирования и распространения акустических колебаний и получения сигналов для свай с искусственными дефектами различной формы и площади.....	57
2.4.3 Моделирование процесса формирования и распространения акустических колебаний и получения сигналов для свай с искусственными дефектами на разной глубине .....	61
2.4.4 Моделирование процесса формирования и распространения акустических колебаний и получения сигналов для свай заводского изготовления.....	63
2.5. Общие положения применения методики вейвлет-преобразования .....	66
2.5.1 Применение методики вейвлет-преобразования для монолитных железобетонных свай.....	68
2.5.2 Применение методики вейвлет-преобразования для свай заводского изготовления .....	70
2.5.3 Отделение полезного сигнала от высокочастотной составляющей .....	73
2.6 Выводы по Главе 2 .....	75
<b>ГЛАВА 3 ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОЦЕССОВ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ .....</b>	<b>77</b>
3.1 Общие требования и особенности подтверждения соответствия (верификации) методик контроля свай в слабых водонасыщенных грунтах.....	77
3.2 Разработка испытательных образцов и испытательного полигона для верификации методики.....	79
3.3 Разработка программы экспериментальных исследований и проведение полевых испытаний на испытательном полигоне для верификации методики измерений.....	88
3.3.1 Область применения методики.....	89

3.3.2 Особенности сейсмоакустического метода, требующие учета при разработке методики контроля .....	89
3.3.3 Требования к средствам контроля .....	90
3.3.3.1 Требования, предъявляемые к аппаратуре для возбуждения и приема упругих волн и обработки сигналов.....	90
3.3.3.2 Требования, предъявляемые к ударным источникам.....	91
3.3.4 Меры безопасности .....	92
3.3.5 Требование к квалификации персонала.....	94
3.3.6 Требования к условиям и выполнению контроля.....	94
3.3.7 Требования к метрологическому обеспечению .....	96
3.3.8 Порядок проведения контроля.....	96
3.3.9 Обработка и оформление результатов контроля .....	97
3.4 Обсуждение результатов проведенных экспериментальных исследований ...	98
3.5 Выводы по Главе 3 .....	102
<b>ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ И РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ.....</b>	<b>103</b>
4.1 Фазовый анализ сигналов, полученных при обследовании испытательных образцов (свай), в частотно-временной области с использованием комплексного вейвлет-преобразования и выделение первичных информативных параметров.	103
4.2 Применение классификаторов с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) к данным (сигналам), полученным при испытании испытательных образцов.....	108
4.3 Выводы по Главе 4 .....	116
<b>ГЛАВА 5 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ (ВАЛИДАЦИЯ) РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ СВАЙ .....</b>	<b>118</b>

5.1 Обследование свай, изготовленных в грунте, с применением методики контроля, основанной на фазовом анализе (вейвлет-преобразовании) для фильтрации сигналов.....	118
5.1.1 Обследование буронабивной сваи большой длины .....	118
5.1.2 Полевые испытания (обследование) железобетонных свай, в составе действующих сооружений.....	120
5.2 Обследование составных свай заводского изготовления в составе свайных фундаментов при реконструкции объектов гражданского строительства с использованием разработанной методики.....	125
5.3 Выводы по Главе 5 .....	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	129
СПИСОК ТЕРМИНОВ .....	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТ О ВНЕДРЕНИИ.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Б СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ .....	145

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы исследования**

Условия строительства Санкт - Петербурга в силу особенностей инженерно-геологического разреза, являются сложными, что значительно отличает их от других регионов нашей страны. Специфической особенностью территории города является наличие слабых, водонасыщенных, тиксотропных грунтов, обладающих свойствами изменять свои физико-механические, прочностные и деформационные характеристики при различного рода динамических воздействий на них. Поэтому при наличии в геологическом разрезе такого вида грунтов, когда залегание прочных несущих слоев находится на глубине 20 м и более, для возведения здания в качестве фундамента используются сваи. По способу заглубления в грунт сваи можно условно разделить на предварительно изготовленные и устраиваемые непосредственно на строительной площадке. При погружении свай заводского изготовления, дефекты в теле свай могут возникать в ходе нарушения технологического цикла их изготовления. В случае устройства свай на строительной площадке подразумевается сооружение скважины в грунте и ее последующее заполнение бетонной смесью. Так как бетонная смесь оказывается в грунтовом массиве до начала своего твердения, она подвержена большому количеству факторов, оказывающих влияние на качество конструкции, что может привести к появлению дефектов в теле свай.

На сегодняшний день в нормативных документах определены основные требования по оценке длины и сплошности тела свай, которые включают выбуривание кернов, а также применение неразрушающих методов контроля. Одним из таких методов является сейсмоакустических метод. Однако, несмотря на его широкое применение, метод обладает рядом методических ограничений.

### **Степень разработанности темы исследования**

Особенности геологического строения Санкт – Петербурга описаны в работах Г.Ф. Странгвейса, Х.Г. Пандеры, Э.И. Эйхвальда, Г.П. Гельмерсена, К.К. Маркова, П.А. Кропоткина, Н.Ф. Погребова, Р. Мурчинсона, Р.Э. Дашко, М.А. Лавровой, Л.Г. Заварзина и других ученых. Вопросами изучения

появления дефектов в сваях и природой их происхождения занимались такие ученые, как К. Fleming, A. Weltman, M. Randolph, K. Elson и другие. Особенности формирования дефектов в условиях слабых водонасыщенных грунтов выявили ученые А.И. Осокин, Р.А. Мангушев, А.Н. Гайдо, И.П. Дьяконов. Применение и развитие методов для обследования свайных фундаментов связаны с именами таких специалистов, как J.M. Amir, N. Massoudi, F. Rausche, G. Likins, G. Goble. В России вопросом контроля качества подземных конструкций занимаются И.Н. Лозовский, А.А. Чуркин, В.В. Капустин, А.Ю. Хмельницкий, а также различные предприятия, специализирующиеся на данном вопросе.

Несмотря на явные преимущества и быстроту сейсмоакустического метода, он также обладает рядом ограничений. Например, в большинстве случаев метод испытаний не позволяет достоверно определить длину свай, а также локализовать дефекты в случае выявления первой значительной аномалии. В связи с этим, необходима разработка методики контроля и комплекса аппаратных и программных средств, обеспечивающих повышение достоверности интерпретации данных, полученных при помощи сейсмоакустического метода.

### **Предмет, объект исследования**

**Предметом исследования** являются процессы возбуждения, распространения и регистрации упругих волн, а также алгоритмы обработки и анализа получаемых сигналов при сейсмоакустическом контроле свай.

**Объектом исследования** является сейсмоакустический метод неразрушающего контроля свай, устраиваемых в слабых водонасыщенных грунтах или изготавливаемых в производственных условиях.

**Цель работы** – расширение перечня и повышение достоверности выявления дефектов, возникающих в железобетонных сваях при их изготовлении в производственных условиях и формировании в слабых водонасыщенных грунтах путем совершенствования принципов и методов получения и обработки сигналов сейсмоакустического метода неразрушающего контроля.

**Идея** – мультисигментное ударное возбуждение акустических колебаний в теле свай и последующее комплексное вейвлет-преобразование получаемых

сигналов, при условии использования классификаторов на основе искусственных нейронных сетей, позволяют повысить достоверность выявления дефектов при возведении и эксплуатации свай в слабых водонасыщенных грунтах.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Анализ процессов образования дефектов при возведении и эксплуатации свай в слабых водонасыщенных грунтах и методов оценки их сплошности и длины.

2. Разработка искусственных дефектов и моделирование процессов получения и обработки сигналов при сейсмоакустическом контроле свай в условиях слабых водонасыщенных грунтов.

3. Разработка технологии изготовления и аттестации испытательных образцов свай с искусственными дефектами в составе полигона для проведения верификации методик контроля.

4. Разработка и верификация методики контроля свайных фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах, повышающей достоверность данных, полученных при использовании сейсмоакустического метода, на основе вейвлет-преобразования и классификаторов с использованием искусственных нейронных сетей.

5. Экспериментальное исследование разработанной методики с использованием испытательных образцов с искусственными дефектами и двухсекционных свай заводского изготовления.

6. Практическое применение и валидация методики в реальных условиях применения свай.

#### **Научная новизна работы:**

1. Разработаны и экспериментально подтверждены модели процессов мультимодального ударного возбуждения и распространения акустических волн, а также получения сигналов пьезоакустических преобразователей, применительно к сваям, сформированным в условиях слабых водонасыщенных грунтов Санкт-Петербурга.

2. Разработаны и реализованы принципы фазового анализа сигналов пьезоакустических преобразователей в частотно-временной области при контроле свай, устраиваемых в слабых водонасыщенных грунтах и в производственных условиях, обеспечивающие повышение разрешающей способности сейсмоакустического метода.

3. Показано, что применение мультимодального ударного возбуждения упругих волн в оголовке свай, изготовленной в слабых водонасыщенных грунтах, и последующий частотно-временной анализ сигналов с пьезоакустического преобразователя, при условии использования классификаторов на основе искусственных нейронных сетей, повышают достоверность выявления дефектов.

4. Разработана и экспериментально обоснована методика мультимодального сейсмоакустического контроля свайных фундаментов, формируемых и эксплуатируемых в слабых водонасыщенных грунтах.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработана и обоснована методика анализа сигналов, полученных при обследовании свай сейсмоакустическим методом, в частотно-временной области с использованием фазы комплексного вейвлет-преобразования, и их классифицирования с использованием искусственных нейронных сетей, позволяющая повысить достоверность выявления дефектов в теле свай, устраиваемых и эксплуатируемых в слабых водонасыщенных грунтах.

2. Обоснована и разработана технология изготовления и аттестации испытательных образцов свай с искусственными дефектами в составе полигона для проведения верификации методик контроля и технических средств, применяемых при контроле.

3. Разработана программа верификации методики сейсмоакустического контроля свай, возводимых и эксплуатируемых в слабых водонасыщенных грунтах.

4. Результаты диссертации использованы в неразрушающем контроле фундаментов зданий и сооружений деятельности ООО «Геострой» в виде

методики контроля сплошности и оценки длины свайных оснований, что подтверждается актом внедрения (Приложение А).

5. По результатам полевых испытаний разработана программа для выявления дефектов буровых и буронабивных свай (Приложение Б).

#### **Методология и методы исследования:**

Анализ распространения акустических волн в сваях в процессе сейсмоакустического контроля осуществлялся методом конечных элементов в программе Comsol Multiphysics. Разработка и аттестация методики сейсмоакустического контроля свай с использованием испытательных образцов свай с дефектами проводилась при помощи аттестованного и поверенного специализированного оборудования Спектр-4.0, предназначенного для оценки длины и сплошности свай.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Мультичастотное ударное возбуждение упругих волн в теле сваи и последующий анализ получаемых акустических сигналов в частотно-временной области с использованием фазы комплексного вейвлет-преобразования и классификаторов на основе искусственных нейронных сетей позволяет расширить перечень и повысить достоверность выявления дефектов свай, формируемых и эксплуатируемых в условиях слабых водонасыщенных грунтов.

2. Применение расчетных моделей многочастотного ударного возбуждения и распространения упругих волн в теле сваи в сочетании с комплексным вейвлет-преобразованием с анализом фазы сигнала, искусственной нейронной сети для анализа информативных параметров, а также натуральных испытательных образцов свай с искусственными дефектами позволили верифицировать разработанную методику сейсмоакустического контроля свайных фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах.

#### **Степень достоверности результатов исследования**

Защищаемые положения, выводы и рекомендации, разработанные в диссертации, базируются на строгих теоретических подходах, теоретически и экспериментально обоснованных математических моделях, подтверждаются

теоретическим обоснованием процессов возбуждения и распространения акустических колебаний в неоднородных средах, а также обработкой получаемых сигналов, сравнением с результатами, полученными в работах.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: I-ой Всероссийской межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, посвященной 80-летию основания кафедры «Строительное производство» (Санкт-Петербург, 2020), International Conference on Complex equipment and quality control laboratories (SEQCL) (Санкт-Петербург, 2020), LXXV Научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (Санкт-Петербург, 2022), Санкт-Петербургском конгрессе «Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке» (Санкт-Петербург, 2022).

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач исследования, анализе процессов образования дефектов при возведении и эксплуатации свай в слабых водонасыщенных грунтах и методов оценки их сплошности и длины, разработке искусственных дефектов и моделировании процессов получения и обработки сигналов при сейсмоакустическом контроле свай в условиях слабых водонасыщенных грунтов, разработке технологии изготовления и аттестации испытательных образцов свай с искусственными дефектами в составе полигона для проведения верификации методик контроля, разработке и верификации методики контроля свайных оснований в слабых водонасыщенных грунтах, повышающей достоверность данных, полученных при использовании сейсмоакустического метода, на основе вейвлет-преобразования и классификаторов с использованием искусственных нейронных сетей, экспериментальном исследовании разработанной методики с использованием испытательных образцов с искусственными дефектами и двухсекционных свай заводского изготовления, практическом применении и валидации методики в реальных условиях применения свай.

**Публикации.** Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 4 печатных работах (пункты списка литературы 30, 42, 54, 84, 86), в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка терминов и списка литературы, включающего 107 наименований. Диссертация изложена на 146 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка и 4 таблицы.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность и искреннюю признательность доктору технических наук, профессору Потапову Анатолию Ивановичу за помощь в постановке и обосновании задач исследований.

Автор выражает особую благодарность Лозовскому Илье Николаевичу за возможность совместной работы, конструктивную критику и неоценимую помощь при формировании общей структуры и главной идеи диссертационного исследования.

Автор искренне признателен кандидату технических наук, заслуженному строителю РФ Осокину Анатолию Ивановичу за бесценный производственный опыт и возможность сбора полевых и экспериментальных данных.

# **ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ УСТРОЙСТВА СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЭТОМ ДЕФЕКТОВ И МЕТОДОВ ИХ ВЫЯВЛЕНИЯ**

## **1.1 Анализ особенностей грунтов в Санкт-Петербурге**

Исследования территории Санкт-Петербурга имеют длительную историю геологического изучения. До начала девятнадцатого века информация о геологическом разрезе территории носила вероятностный характер ввиду отсутствия систематических исследований. Одна из первых работ, связанная с геологическим описанием города появилась ближе к середине девятнадцатого века, что послужило основой для дальнейшего последовательного изучения геологического строения [48]. Такие ученые, как Х.Г. Пандер, Э.И. Эйхвальд, С.С. Куторга и др., получили стратиграфические сведения дочетвертичных образований Санкт-Петербурга [27]. Академиком Г.М. Гельмерсеном была опубликована работа, связанная с формированием геологического разреза послеледникового развития и образованием реки Невы [8]. В области изучения четвертичных отложений и рельефа города основные открытия принадлежат К.К. Маркову и М.А. Лавровой [28, 35]. Первые работы по геофизическим исследованиям и опорному бурению с целью выявления проблематики геологии территории проводились различными научными институтами и учеными, также в середине прошлого века началось активное изучение подземных вод [1, 41]. Существенный вклад в изучение геологического строения города, связанный с геофизическими исследованиями, поиском подземных вод и месторождений строительных материалов, принадлежит ПГО Севзапгеология, ученым В.В. Проскурякову, С.А. Голубеву, К.Д. Беляеву и др [9]. На сегодняшний день особое внимание уделяется оценке инженерно-геологических условий площадки строительства и прогнозу их изменений в ходе работ и дальнейшей эксплуатации сооружения [67, 68].

Геологическое строение Санкт-Петербурга определяется соединением Балтийского щита и Русской плиты, имеющей двухэтажное строение. Фундамент

плиты представлен магматическими и метаморфическими породами, гранитами, гнейсами, диоритами и другими, которые относятся к древнему архей-протерозойскому возрасту [9]. Верхний этаж плиты представлен отложениями осадочного чехла, который также можно разделить на две составляющие толщи – верхнюю и нижнюю. Разрез нижней толщи в основном представлен отложениями вендского комплекса, включающий в себя алевроито-глинистые породы гдовского горизонта, а также песчаники, алевролиты и глины котлинского горизонта. К верхней толще осадочного чехла относятся четвертичные отложения, которые полностью определяют геологию города, характеризуя ее как неустойчивую и способную к развитию пластических деформаций. Это необходимо учитывать при проектировании и ведении работ, связанных с подземным строительством [18].

Карты четвертичных отложений были составлены такими учеными как А.А. Дмитриев, В.А. Соловьева, П.Е. Москаленко и В. Г. Ауслендер [2, 19, 37, 46].

До начала активного освоения города большую часть территории Санкт-Петербурга составляли болотные отложения, которые впоследствии либо снимались, либо засыпались, тем самым оказавшись под слоем техногенных образований. В целом болота оказали негативное воздействие на нижележащие слои грунта за счет присутствия микроорганизмов, генерирующих различные газы. Образование таких газов приводит к разуплотнению песчаных и глинистых грунтов, способствуя их переходу в неустойчивое состояние. Такая тенденция негативного влияния прослеживается до глубины пятидесяти метров.

Как отмечалось выше, одной из особенностей геологического разреза является наличие техногенного слоя (tIV), представленного насыпными грунтами, строительными отходами, а также различного рода органическими отложениями. Зачастую такие отложения не превышают толщину в один метр, но в некоторых районах их мощность может достигать семи-восьми метров. Такие виды грунтов не учитываются при проектировании фундаментов для подземных сооружений и зачастую не обладают физико-механическими характеристиками, которые присваиваются грунтам по результатам инженерно-геологических изысканий [17].

Далее под современными техногенными образованиями залегают морские и озерные отложения (m, l IV), представленные песками, суглинками и супесями. Залегающие пески зачастую являются водонасыщенными, плотными или средней плотности и обладают средними физико-механическими характеристиками. Супеси и суглинки, залегающие в данном виде отложений, зачастую являются пластичными, мягкопластичными, а также тиксотропными, прочностные и деформационные свойства которых, являются достаточно низкими. Такие виды грунтов, как правило, не используются в качестве несущего слоя.

Зачастую под морскими и озерными отложениями залегают озерно-ледниковые отложения (lgIII), но на абсолютных отметках свыше десяти метров, такие грунты располагаются сразу под техногенными образованиями. Озерно-ледниковые отложения представлены в основном суглинками и супесями, имеющими слоистую, ленточную текстуру, а также высокое влагонасыщение. У данного вида отложений отмечена способность к тиксотропным превращениям, которая выражается в переходе этих грунтов в более текучее состояние под воздействием динамических нагрузок, а после прекращения – в частичном восстановлении своей структуры и прочности. Помимо этого, вся толща озерно-ледниковых отложений склонна к морозному пучению.

Далее происходит постепенный переход от массива озерно-ледниковых отложений к кровле морены, встречающейся на глубине более 10 м. Именно данный массив грунта чаще всего используется для реализации строительных объектов Санкт-Петербурга в части устройства свайных фундаментов зданий и сооружений. Ледниковые образования-морены (gIII) представлены в основном суглинками, реже супесями и редко глинами. Как правило в толще таких отложений присутствуют включения гравия и гальки изверженных пород. Также их геологический разрез может включать в себя линзы песков, содержащих напорные воды, прорыв которых может привести к развитию деформаций вмещающей толщи. На территории Санкт-Петербурга выделяют три морены: верхнюю-осташковскую, среднюю-московскую и нижнюю-вологодскую. Прочностные и деформационные характеристики морен варьируются и зависят от

условий их формирования и залегания, а консистенция может изменяться от плотной до текучей [18, 47].

Вендские отложения (Vkt2), залегающие под моренными отложениями, включают в себя твердые и полутвердые глины. Обладают высокими прочностными и деформационными характеристиками. Залегание такого типа отложений находится на глубине более двадцати метров и ниже, также характеризуется неравномерностью залеганий. Свайные фундаменты, несущим слоем которых являются вендские глины, обладают высокой несущей способностью по грунту [18].

## **1.2 Свайные фундаменты и их дефекты в слабых водонасыщенных грунтах Санкт-Петербурга**

### **1.2.1 Анализ применения свайных технологий**

Рассмотрим свайные технологии, традиционно применяемые в современных условиях: погружение готовых заводских железобетонных свай и устройство буронабивных свай непосредственно в грунте в условиях строительной площадки [32].

#### **Предварительно изготовленные забивные и вдавливаемые железобетонные сваи:**

На данный момент использование свай заводского изготовления составляет небольшой процент. В основном это периферийные объекты жилищного и промышленного строительства. Сваи данного вида широко применялись в 60-70-х годах прошлого столетия [85]. В зависимости от способа их погружения в грунт, могут оказывать значительное влияние на окружающую застройку. Опыт использования показал, что устройство методом забивки свайных полей предварительно изготовленных свай имеет ряд существенных недостатков, таких как аварии и разрушения окружающей застройки, что послужило поиском новых более безопасных методов и технологий возведения свайных фундаментов. Погружение свай вдавливанием является более щадящим методом по отношению к окружающей застройке за счет минимизации вибрационного воздействия [33].

Данный метод заключается в погружении предварительно изготовленных свай путем вдавливания или забивки специальным оборудованием-молотом. Для забивки применяются дизель-молота и гидравлические молота с регулируемой силой удара и разными весами молота, для вдавливания свай применяются специальные сваевдавливающие установки. Также технология вдавливания позволяет вести погружение свай в предварительно пробуренные скважины (лидерное бурение), что снижает усилие вдавливания, обеспечивая практически полную бесшумность за счет работы электрогидравлического привода машины.

Преимущества технологии погружения свай методом забивки: простота изготовления свай, технологичность процесса, дешевизна.

Недостатки технологии: Динамическое воздействие на окружающую застройку в случае забивки [71]. Ограниченность несущей способности по грунту и материалу. Отсутствие возможности погружения в плотные грунты и изготовления свай большой глубины и поперечного сечения, следовательно, ограниченность вертикальной нагрузки и соответственно увеличение их количества под застройку. Ограничение применимости метода в грунтовых условиях, когда в слоях грунта содержатся твердые крупные включения или имеются слои песчаных разностей средней плотности или плотных, а также при прохождении слоев глинистого грунта тугопластичной, полутвердой или твердой консистенции [80]. В определенных грунтовых условиях, в частности в грунтах с ленточной текстурой, погружение свай вдавливанием может привести к выпору грунта и дополнительным деформациям основания и фундаментов близлежащей застройки. При активном устройстве свайного поля, вновь выполняемые сваи могут смещать ранее выполненные от проектного положения. Сваи выполняются только с поверхности грунта, что при необходимости откопки котлована потребует дополнительных затрат по срубке свай. Откопка котлованов должна производиться послойно, так как при локальной выборке на всю глубину могут происходить смещение грунтового массива, предварительно напряженного после погружения свай, вследствие чего сваи могут смещаться или наклоняться [105].

Технологическая схема: процесс устройства свай начинается с того, что заводская свая поднимается и закрепляется на копровой установке, затем копровая установка с закрепленной на ней сваей устанавливается на точку погружения. После этого начинается погружение сваи путем вдавливания или воздействия динамических ударов по ней ударной частью молота. Погружение происходит до проектной отметки либо до отказа (Рисунок 1.1).

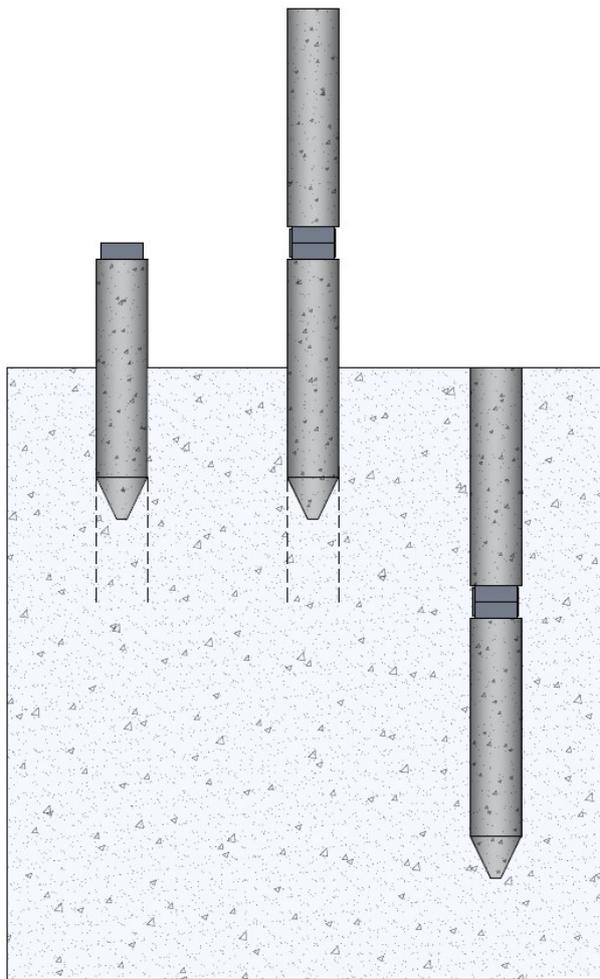


Рисунок 1.1 – Погружение сваи заводского изготовления: а) погружение нижней секции; б) приваривание верхней секции; в) погружение готовой сваи на проектную отметку

### **Сваи, изготавливаемые под защитой обсадной трубы:**

В практике фундаментостроения и геотехнического строительства данная технология считается классической.

Технология бурения и устройства свай под защитой обсадной трубы подразумевает под собой предварительную обсадку скважины специальной

инвентарной обсадной трубой, элементы которой соединяются при помощи болтового соединения. Конструкция трубы выполнена специальным образом для защиты трубы от скручивания и износа стенок при длительном использовании. После погружения секции трубы в грунт из нее извлекается породоразрушающим буровым инструментом (шнеком, колонковым буром, ковшебуром и др.) в зависимости от состояния буримого грунта. Для обводненных подвижных пород основным условием бурения является удерживание грунтовой пробки в обсадной трубе, это подразумевает то, что низ обсадной трубы должен всегда быть ниже отметки забоя для исключения обрушения грунта за пределами контура трубы. В случаях с очень подвижными породами полость внутри трубы заполняется водой или глинистым раствором для создания компенсирующего гидростатического давления. После окончания бурения скважина армируется предварительно изготовленным арматурным каркасом, при необходимости секции армокаркаса свариваются между собой прямо над скважиной. Затем происходит заполнение скважины бетонной смесью при помощи бетонолитной трубы. Бетонирование осуществляется снизу-вверх, что позволяет равномерно заполнить скважину и вытеснить воду или глинистый раствор в случаях, когда скважина обводнена, а также исключить расслоение бетонной смеси, возникающее при ее сбросе с большой высоты [33, 34].

#### Преимущества свай, изготавливаемых под защитой обсадной трубы:

Возможность работать вблизи окружающей застройки за счет отсутствия динамических и вибрационных воздействий на грунт. Безошибочный контроль процесса бурения с достижением несущего слоя. Возможность разбуривать и извлекать валуны. Заполнение скважины производится через бетонолитную трубу, что исключает образование шеек при наличии в скважине арматурного каркаса. В процессе бурения осуществляется прямой контроль соответствия фактических инженерно-геологических условий с проектными значениями. Возможность устройства уширения позволяет наиболее полно использовать несущую способность свай. Поверхность свай по всей высоте достаточно ровная. Дефекты, появляющиеся при устройстве данного вида свай, образуются чаще

всего из-за нарушений технологии или при наличии исключительно сложных геологических условий.

Недостатки технологии:

Низкая производительность заставляет искать проектные решения, обеспечивающие полное использование несущей способности свай по грунту.

Технологический цикл устройства:

1) установка бурового станка на точку бурения; 2) посекционное погружение обсадной трубы на требуемую глубину, извлечение грунта из обсадной трубы; 3) извлечение шнека из обсадной трубы, зачистка забоя скважины от шлама, установка арматурного каркаса; 4) бетонирование свай методом вертикально перемещающейся трубы; извлечение обсадной трубы (Рисунок 1.2).

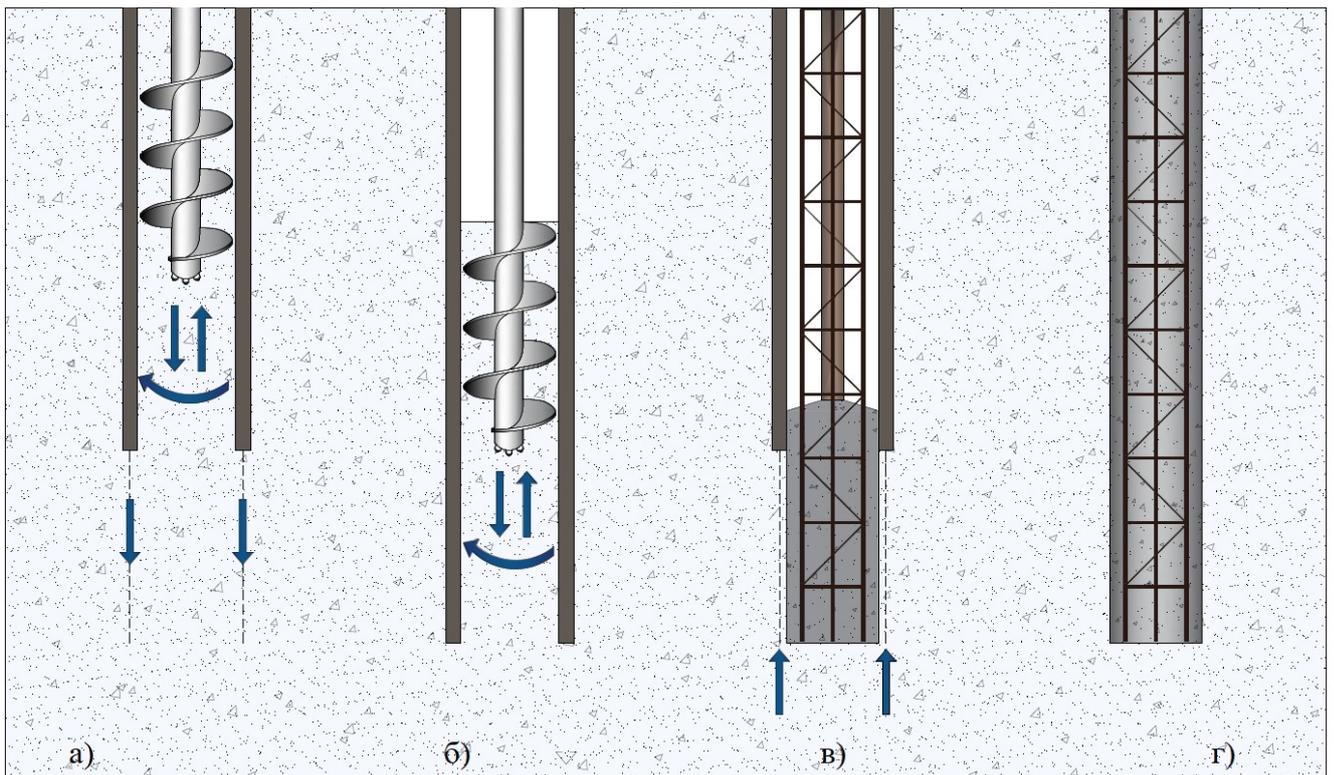


Рисунок 1.2 – Технологический цикл устройства: а, б) бурение скважины коротким проходным шнеком под защитой обсадной трубы; в) погружение арматурного каркаса и бетонирование скважины; г) готовая свая

**Буринабивные сваи, изготавливаемые непрерывным проходным шнеком:**

Устройство свай при помощи полых проходных шнеков ППШ/(СФА) производится шнеком заданной длины, которая соответствует как правило длине будущей сваи. Шнек представляет из себя полую толстостенную трубу со спиральной ребордой для выноса грунта. Шнеки, используемые для бурения, могут различаться диаметром, конструкцией лидерного элемента и типом режущих зубьев. Лидерный шнек – это усиленный элемент шнековой колонны, которая непосредственно разрушает сложение грунтовых пород. Они различаются конструкцией в зависимости от типа буримого грунта, однозаходные – для более мягких грунтов, двухзаходные для более твердых [85].

Работа по устройству сваи по технологии СФА начинается с забуривания шнека, в мягких породах забуривание происходит по принципу «сверла», то есть при проходке шнека вниз не происходит извлечения грунта, он в полном объеме остается на реборде шнека и вращается вместе с ней.

Для равномерности диаметра ствола будущей сваи скорость погружения должна соответствовать скорости вращения, чтобы исключить вынос лишней породы.

Бетонирование скважины происходит путем подачи бетонной смеси через трубу шнека на забой скважины с одновременным его подъемом. Технология подразумевает подачу бетонной смеси при помощи бетононасоса при избыточном давлении. Этот аспект так же влияет на формирование тела сваи. Давление бетона может создавать локальные уширения в прослоях слабых грунтов.

Далее происходит армирование скважины путем погружения в подвижную бетонную смесь армокаркаса при помощи вибрирования.

Широко используется в грунтах, слои которых существенно отличаются по прочности. Технология особенно эффективна при проходке большой толщи песков, полутвердых и тугопластичных суглинков, когда невозможно применение свай уплотнения [59, 72, 73, 107].

Преимущества свай, изготовляемых по технологии непрерывного проходного шнека:

Высокая производительность. Качественное заполнение скважины бетоном за счет подачи смеси под давлением при помощи бетононасоса. Работа в сложных геологических условиях. Бесшумность процесса, что позволяет использовать данную технологию городских условиях. Большая несущая способность сваи при аналогичных параметрах.

Недостатки технологии:

Тиксотропное разупрочнение грунта в околосвайном массиве, следствием чего является ограничение по использованию данной технологии вблизи окружающей застройки, если модуль деформации грунта меньше 5 МПа, а угол внутреннего трения меньше 10

Технологический цикл устройства:

1) установка буровой установки на точку устройства сваи; 2) погружение шнековой колонны до проектной отметки; 3) постепенное извлечение шнека из скважины с одновременным ее заполнением бетонной смесью, подаваемой через полый шнек бетононасосом; 4) армирование скважины, заполненной бетонной смесью (Рисунок 1.3).

**Буринабивные сваи уплотнения:**

Технология заключается в разработке скважины без извлечения грунта за счет уплотнения особым рабочим органом. Применяются в сложных геотехнических условиях, в слабых водонасыщенных грунтах, при усилении насыпей дорожного полотна [79, 96, 97, 99].

Устройство свай при помощи раскатчика (FDP) производится эллипсоидновидным буровым органом равным по диаметру будущей свае. Раскатчик в передней части имеет небольшой лидерный шнек, который предварительно разрушает породу, а затем под силой давления буровой машины и раскатчика уплотняет ее в стенки скважины [85].

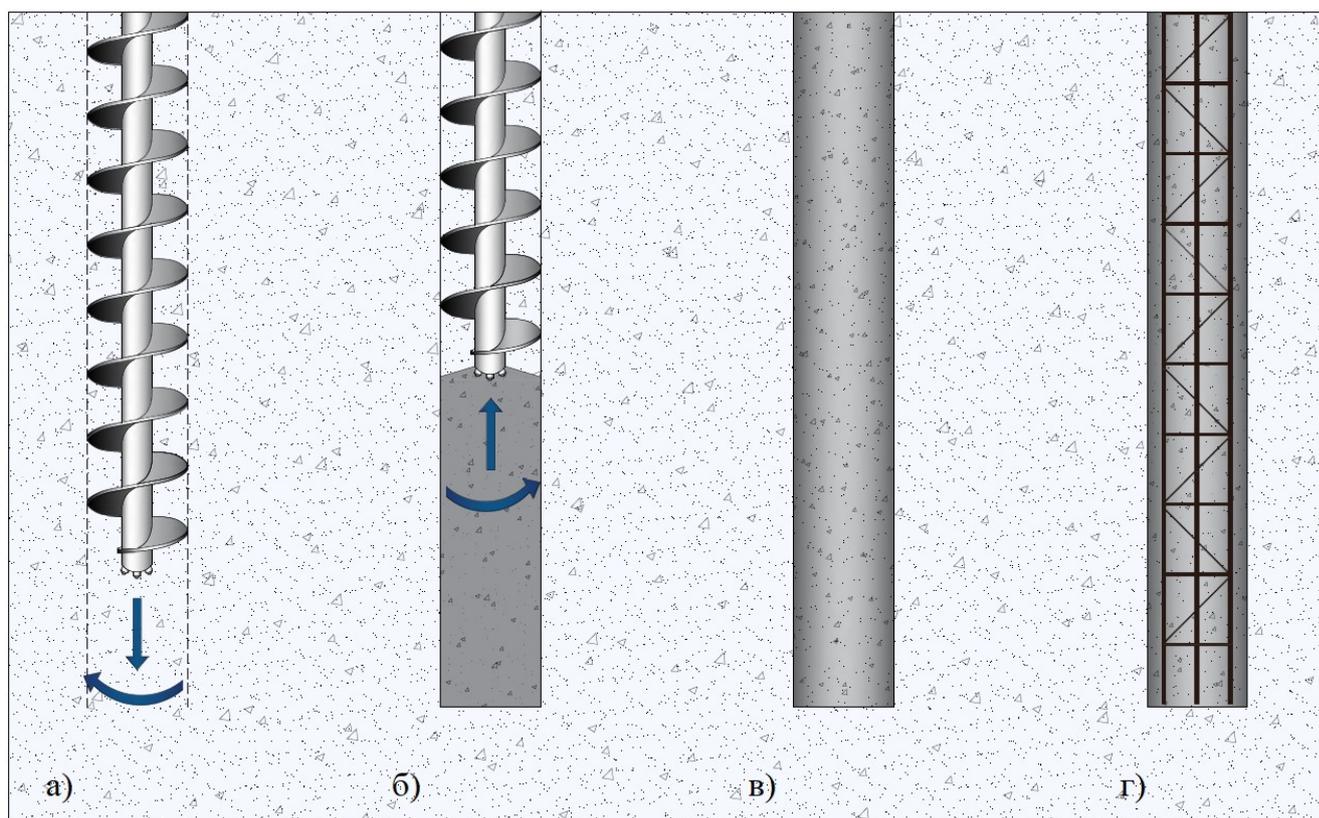


Рисунок 1.3 – Технологический цикл устройства: а) пробуривание скважины полым проходным шнеком; б) поднятие шнека с одновременной подачей бетонной смеси из бетононасоса; в) скважина, заполненная бетонной смесью; г) погружение арматурного каркаса

Бетонирование скважины происходит путем подачи бетонной смеси через трубу раскатчика на забой скважины с одновременным его подъемом. Технология подразумевает подачу бетонной смеси при помощи бетононасоса при избыточном давлении.

Далее происходит армирование скважины путем погружения в подвижную бетонную смесь армокаркаса при помощи вибрирования [33, 34, 74].

#### Преимущества буронабивных свай уплотнения:

Высокая несущая способность. Высокая производительность. Высокое качество заполнения скважины бетоном за счет подачи бетона под давлением. Контроль параметров бурения бортовым компьютером. Более низкая стоимость за счет отсутствия шлама при бурении.

Поверхность свай, выполненных в скважинах, устроенных таким способом, достаточно ровная и соответствует заданному диаметру по всей длине скважины.

Недостатки технологии:

Требуется соблюдение ограничений при работе вблизи существующих зданий, иначе может произойти поднятие дна котлована. При активном устройстве свайного поля, вновь выполняемые сваи могут смещать ранее выполненные от проектного положения.

Технологический цикл устройства:

1) установка бурового станка на точку; 2) погружение бурового инструмента с системой уплотнения грунта до проектной отметки; 3) извлечение бурового инструмента с одновременным бетонированием скважины; 4) армирование скважины (Рисунок 1.4).

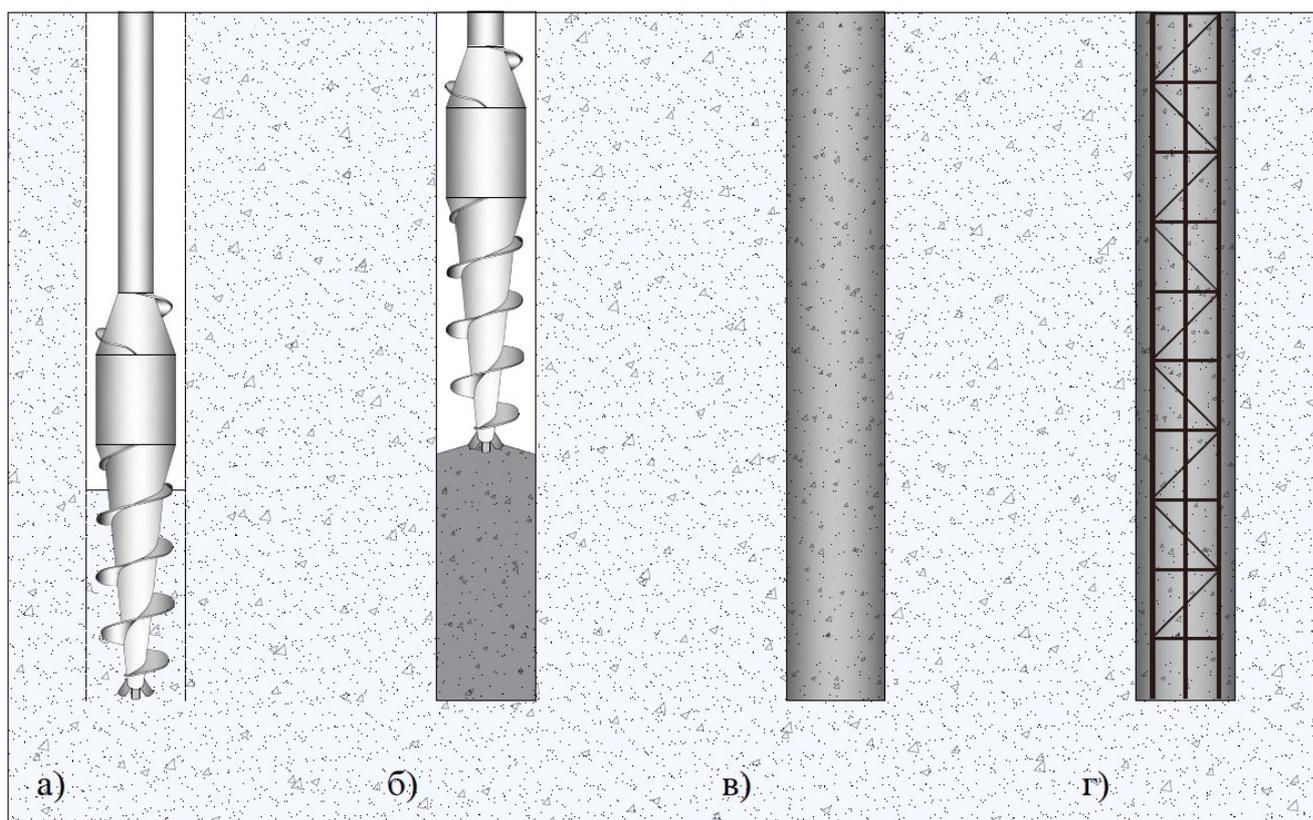


Рисунок 1.4 – Технологический цикл устройства: а) разработка скважины рабочим органом «раскатчиком»; б) поднятие «раскатчика» с одновременной подачей бетонной смеси из бетононасоса; в) скважина, заполненная бетонной смесью; г) погружение арматурного каркаса

### 1.3 Дефекты, возникающие при устройстве свай

Зачастую при устройстве свай заводского изготовления используются двухсекционные сваи [12]. Стыковка секций происходит за счет различных соединений и стыков [86]. Одним из наименее трудозатратных в изготовлении является сварной стык. Наиболее распространенный тип дефекта в таком соединении – коррозия, возникающая при некачественной обработке стыка, или некачественной сварке.

Также одним из распространенных дефектов являются поперечные трещины. В момент погружения при разной плотности грунта, в который погружается свая, возможно ее отклонение от вертикали, что может спровоцировать появление поперечных трещин или излома в стыке (в случае составной сваи). Продольные трещины также могут появиться от воздействия зажимного устройства вдавливающей машины при неправильных регулировках усилия зажима или от удара молота (для свай забивных) (Рисунок 1.5).

Описанные дефекты в первую очередь приводят к коррозии арматуры внутри сваи, что является критичным ввиду низкого армирования [22]. Это может привести к сокращению срока службы, а также разрушению при наличии горизонтальных нагрузок на сваю [15].



Рисунок 1.5 – Дефекты в сваях заводского изготовления

Так как бетонная смесь оказывается в грунтовом массиве до начала своего твердения, она подвержена большому количеству негативных факторов,

оказывающих влияние на качество конструкции. Это негативное влияние приводит к появлению дефектов в теле сваи, разновидности этих дефектов в свою очередь зависят от применяемой технологии изготовления и от квалификации производителей работ.

Дефекты, возникающие в теле сваи, можно разделить на несколько категорий: связанные с нарушением технологии, вызванные ошибками в проекте, а также взаимодействием тела сваи с окружающим грунтовым массивом [94].

**Утоньшения** – это уменьшения диаметра сваи по поперечному сечению, они могут быть как локальные, несколько сантиметров в высоту, так и достаточно длинным по высоте ствола сваи. Как правило, утоньшения имеют уменьшение диаметра сваи до арматурного каркаса сваи, внутри каркаса бетон менее подвержен влиянию (Рисунок 1.6). Этот дефект является следствием как природных сил, так и нарушения технологии бетонирования. Давление грунтовых стенок может быть достаточно велико и передавливать подвижную бетонную смесь. Бетонирование сваи в обсадной трубе производится при одновременном подъеме самой трубы, при этом в трубе должен постоянно находиться бетон, который создает гидростатическое противодействие для удержания стенок скважины от обрушения – в рыхлых грунтах, и обжатия – в упругих пластичных грунтах в той части скважины, где труба уже извлечена. При недостаточной квалификации персонала, производящего бетонирование, при использовании данной технологии бывают случаи, когда столб бетонной смеси, находящейся в обсадной трубе, недостаточен и это также приводит к появлению утоньшений [69, 84, 94].



Рисунок 1.6 – Дефект в свае, изготавливаемой в грунте, «утонышение»

**Размытия** – это нарушения сплошности бетонной смеси, обусловленные наличием в грунтовом разрезе сложных гидрогеологических условий в частности наличие мощных слоев со свободно передвигающейся водой. Такие дефекты возникают в песчаных или гравелистых грунтах с сильным фильтрующим потоком (Рисунок 1.7). Для данных дефектов характерно отсутствие цементного камня в теле сваи, так как еще до его твердения сильный водный поток частично или полностью его вымывает, и в теле сваи остается только крупный или мелкий наполнитель [69, 84, 94].



Рисунок 1.7 – Дефект в свае, изготавливаемой в грунте, «размытие»

**Вывалы грунта** – дефект, при котором в бетонное тело сваи проникают крупные включения грунта, нарушающие сплошность тела сваи (Рисунок 1.8). Такие дефекты возникают исключительно при нарушении технологии бетонирования сваи. Массив грунта при бурении подвергается воздействию со стороны бурового инструмента, при котором достаточно крупные элементы грунта могут проникнуть в незатвердевший бетон, особенную опасность этот дефект может представлять в сваях, не армируемых каркасом, так как в этом случае элементы грунта могут проникнуть по всему диаметру сваи [69, 84, 94, 101].



Рисунок 1.8 – Дефект в свае, изготавливаемой в грунте, «вывалы грунта»

**Плачущие сваи** – дефект, также связанный с наличием в геологическом разрезе мощных водоносных горизонтов в сочетании с хорошо фильтрующими грунтами. При этом дефекте по центру сваи на большую глубину образуется отверстие, которое в свою очередь появляется из-за того, что грунтовая вода вымывает цементное молоко (Рисунок 1.9). Предположительно это явление связано с тем, что при всех технологиях бетонирование производится через центр сваи и в независимости от принципа подачи бетона в скважину, будь то бетононасос или бетонолитная труба, уплотнение бетона происходит радиально т.е. центр сваи менее уплотнен чем периметральная часть. При этом если на какой-то отметке по высоте сваи встречается мощный водный напорный

горизонт, и он промывает сваю насквозь, то напорная вода по наименьшему сопротивлению т.е. по центру еще не затвердевшего бетонного столба поднимается на поверхность. Этот дефект можно с большой вероятностью считать неразрывно связанным с размывом [69, 84, 94].



Рисунок 1.9 – Дефект в свае, изготавливаемой в грунте, «плачущие сваи»

**Выдавливание бетона** – это исключительно дефект технологии. При этом дефекте бетон изготовленной в грунте сваи оказывается в стороне от арматурного каркаса (Рисунок 1.10). Данный дефект возникает при массовом устройстве свай по технологиям уплотнения, когда в грунтовом массиве после изготовления свай создается избыточное давление, которое при устройстве каждой новой сваи все увеличивается и в итоге приводит к тому, что подвижная бетонная смесь вновь выполненной сваи выдавливается массой грунта, а каркас остается в проектном положении [69, 84, 94].



Рисунок 1.10 – Дефект в свае, изготавливаемой в грунте, «выдавливание бетона»

#### **1.4 Изменения физико-механических характеристик бетонной смеси при твердении в грунте**

При изготовлении свай, выполняемых в грунте, крайне важно изучить физико-механические характеристики, гидрогеологические условия, наличие различного рода включений в грунтах, из которых сложен геологический разрез. Изучение этих параметров даст понимание как свая будет работать в конструкции здания, от этого напрямую зависит выбор технологии бурения и параметров оборудования необходимого для производства работ. Также более тщательное изучение геологического разреза поможет проанализировать состояние грунтов после их разбуривания, так как все породы по-разному ведут себя, когда нарушается их естественное сложение [33, 34].

Система «свая-грунт» является довольно сложной, так как твердение бетонной смеси в теле сваи напрямую зависит от окружающего ее грунтового массива и отличается от нормальных ( $t \approx 25^\circ\text{C}$ , влажность 90%) условий твердения. Сваи такого вида, ввиду геологических особенностей Санкт-Петербурга, где плотные слои грунта залегают на отметке -20 м и ниже, проектируются довольно длинными. В связи с этим бурение скважины для будущей сваи является достаточно сложным процессом. Зачастую, несмотря на квалификацию и опыт машиниста, профиль, геометрические параметры и несущая способность сваи в

той или иной степени будут отличаться от проектных решений. Это связано с инженерно-геологическим разрезом, который преимущественно представлен напластованием слабых водонасыщенных грунтов, а также водонапорных горизонтов [87].

Так как реакция при которой происходит твердение цементного камня, это сложная реакция гидратации [3, 4], в которой вода играет ключевую роль, то исходя из этого наличие или отсутствие грунтовых вод в скважине непосредственно оказывает влияние на скорость твердения бетона. Наиболее подверженной влиянию в данном случае оказывается контактная зона на границе раздела между бетоном и грунтом. Но существуют случаи, когда вода проникает и оказывает влияние на твердения бетона по всей площади поперечного сечения сваи.

Полное отсутствие воды в окружающем сваю грунте нарушает баланс воды в бетонной смеси. Свободная вода, которая находится в бетонной смеси на стадии начала твердения бетона не участвует в реакции гидратации и поэтому она может поглощаться сухим грунтом, окружающим сваю и вызывать его намокание. У этого процесса существует два негативных фактора. Нарушается баланс воды в бетонной смеси, что может привести к замедлению реакции гидратации и последующему снижению прочности бетона в проектном возрасте. В свою очередь вода, проникающая в грунт, может менять его характеристики в зоне контакта. Это имеет отношение больше к сухим глинистым грунтам, у которых появляется пластичность. Что может привести к снижению несущей способности сваи.

Минимальное воздействие оказывает наличие капиллярной или связанной воды в грунте. Влажный грунт без свободной воды в своей структуре не отдает и не вбирает в себя воду из бетонной смеси. Такие условия не оказывают существенного влияния на скорость твердения бетона.

Существенное влияние оказывает свободная, несвязанная вода в грунте, которая может проникать и создавать избыток молекул воды, что приводит к

образованию пор в цементном камне. Влияние этого типа грунтовых вод оказывает воздействие только на контактную зону между грунтом и бетоном.

Наиболее опасны для твердеющего бетона являются грунтовые воды, подверженные какому-либо упорядоченному горизонтальному движению в массиве грунта (сезонные водотоки, подземные реки, техногенная вода), и межпластовые напорные воды, подверженные вертикальному движению. Горизонтальные водотоки как правило возникают в хорошо фильтрующих грунтах (песок, супесь) скорость фильтрации такой воды может иметь достаточную силу для того чтобы вымыть цементное молоко из ствола свежесобетонированной сваи и оставить в этом месте дефект или же существенно снизить прочностные характеристики бетона. Межпластовая вода, которая зажата между двумя водоупорами, может подниматься на поверхность с большим давлением при нарушении целостности водоупора во время устройства скважины. После бетонирования скважины напорные воды также могут подниматься вдоль ствола сваи и размывать зону контакта. При высоком давлении напорных вод они проникают в бетонную смесь и поднимаются по центру сваи, размывая и вынося на поверхность цементное молоко. Это существенно снижает прочность бетона в свае и создает как локальные дефекты, так и полное нарушение целостности ствола сваи.

Главной характеристикой бетона является модуль упругости, который тесно коррелирует с прочностью [5].

Рассмотрим более подробно факторы, которые могут приводить к понижению прочности бетона в теле сваи и с чем это связано:

1. Тип грунта, окружающего сваю:

- 1) Несвязные грунты. Несвязанные между собой частицы и включения грунта будут стремиться проникать в свежесобетонированный бетон. Этому зачастую способствует наличие избыточных грунтовых вод. Само по себе наличие грунтовой воды не опасное для бетона явление. Но как раз в несвязных грунтах часто фиксируется наличие избыточной воды (например, водонасыщенный песок), которая может мигрировать в грунте. Миграция (движение) происходит в

трех направлениях: 1) по вертикали вниз при движении осадочной воды с поверхности в сторону водоупорного горизонта; 2) по вертикали вверх при наличии напорных горизонтов грунтовых вод и по горизонтали в местах усиленных водотоков под склонами возвышенностей или под землей в старых руслах рек, где сохраняется высокое значение фильтрации и водопритока. Вертикальное движение может оставлять размытые вертикальные каналы вдоль боковой поверхности свай. Также вода может проникать внутрь бетонного столба и пробиваться на поверхность через центральную часть свежееизготовленной свай, такие случаи получили название «плачущих свай». 3) Горизонтальное же движение самое опасное и может приводить к размытию бетона на все сечение буровой свай и приводить к образованию каверн и пустот в теле свай, создавать локальные утоньшения ствола свай так называемые «шейки».

В несвязных грунтах без водонасыщения (плотный пылеватый песок) может возникать обратный эффект, когда грунт поглощает воду. В таком случае нарушается процесс гидратации цемента, что приводит к замедленному набору прочности

2) Связные грунты. Оказывают на поверхность свай меньшее влияние, в случае с такими грунтами могут встречаться локальные утоньшения по стволу свай, обусловленные наличием пластичных связных грунтов, которые под воздействием бытового давления могут прийти в движение и обжать ствол свежееизготовленной свай. Имеют место и локальные каверны, нарушающие форму сечения свай, которые образуются из-за вывалов крупных частей грунта с низкой пластичность. Такие дефекты обусловлены исключительно технологическими особенностями изготовления скважин и появляются после нарушения целостности сложения массива грунта при его разбурировании.

## 2. Степень водонасыщения грунта:

Бетон, уложенный в скважину, выполненную с выемкой грунта и без нее, взаимодействует по-разному поэтому ниже оба случая рассматриваются отдельно.

Скважина, изготовленная с выемкой грунта, как следует из описания различных технологий выше, имеет более подверженную разрушению боковую

поверхность из-за особенностей технологии. В таких скважинах, выполненных в слабых грунтах, широко распространены случаи вывалов и осыпаний стенок в бетонную смесь. Это приводит к перемешиванию бетонной смеси в пограничной зоне «бетон-грунт» и приводит к замедлению твердения на границе материалов, и снижению прочности бетонной смеси. Так как боковая поверхность сваи, выполненной с выемкой грунта, более неровная, характер движения грунтовой воды вокруг этой сваи достаточно хаотичен, будь то напорная вода, поднимающаяся к поверхности или горизонтальные водотоки. Это может приводить к непрогнозируемым образованиям размывов и дефектов. Твердение ствола сваи по длине происходит неравномерно.

Скважина, выполняемая по технологии уплотнения грунта, имеет более гладкую поверхность, так как грунт в прямом смысле раскатывается в стенки будущей скважины. При уплотнении грунта повышаются его характеристики в пограничной зоне, но поскольку грунты имеют упругость, после бетонирования скважины есть вероятность наступления так называемого «обратного эффекта». Уплотнённый грунт может сдавить свежешелюженный бетон, который до начала твердения можно отнести по свойствам к жидкости. Особенно это свойство заметно при массовом устройстве свайного поля с частым расположением свай, когда весь грунтовой массив подвержен избыточному уплотнению [33]. Эти же факторы и влияют на взаимодействие свай с грунтовой водой. Так как боковая поверхность более гладкая, то движение напорной воды происходит более равномерно и не нарушает ствол сваи. Но при массовом выполнении свай напряжение в массиве грунта создается во многом из-за воды, которая не подвержена сжатию. В таких случаях вода может проникать в тело сваи даже в грунтах с отсутствующими горизонтальными водотоками и напорными горизонтами, и приводить к появлению как уже говорилось ранее «плачущих свай», либо изливу вытесненной воды через центр свежешелюженных свай. Это явление приводит к размыву центральной части свай, снижению марочной прочности бетона и увеличению времени набора прочности [85].

## **1.5 Характеристика методов неразрушающего контроля и возможности их применения при устройстве свай в грунтах Санкт-Петербурга**

### **Параллельный сейсмический метод (Parallel Seismic Method)**

Параллельный сейсмический метод представляет собой скважинные испытания для определения длины свайного фундамента, а также для обнаружения дефектов и аномалий. Для проведения испытаний необходимо установить обсаженную скважину близко к испытываемой свае. Данный метод применяется в случае, когда отсутствует доступ к оголовку сваи или же когда свая достаточно длинная [57].

Параллельный сейсмический метод включает ударное воздействие с поверхности исследуемой конструкции (Рисунок 1.11). Приемник, перемещающийся по пробуренной рядом с обследуемой сваей скважине, регистрирует продольные и/или поперечные волны, распространяющиеся вдоль тела сваи. Сама пробуренная скважина должна соответствовать диаметру от 5 до 10 см, располагаться как можно ближе к испытываемой свае и буриться на проектную отметку не менее чем на 3 м ниже ожидаемой длины сваи. В случае использования гидрофона в качестве приемника пробуренная скважина должна быть обсажена, заглушена на дне и заполнена водой [104].

При проведении испытания с использованием параллельного сейсмического метода приемник сначала опускают на дно пробуренной скважины и производят измерение. Затем приемник поднимают на 30 или 60 см и производят второе измерение. Этот процесс продолжается до тех пор, пока приемник не достигнет устья скважины. Длина сваи оценивается по координате точки излома годографа.

Ограничения метода заключаются в трудоемкости процесса ввиду того, что для проведения испытаний требуется бурение скважины. В случае высокой плотности окружающего сваю грунтового массива не всегда возможно определить отражение от нижнего конца сваи. Также невозможно определить длину сваи ниже первой значительной акустической аномалии. Точность определения длины сваи при помощи данного метода оценивается в 5% [93].

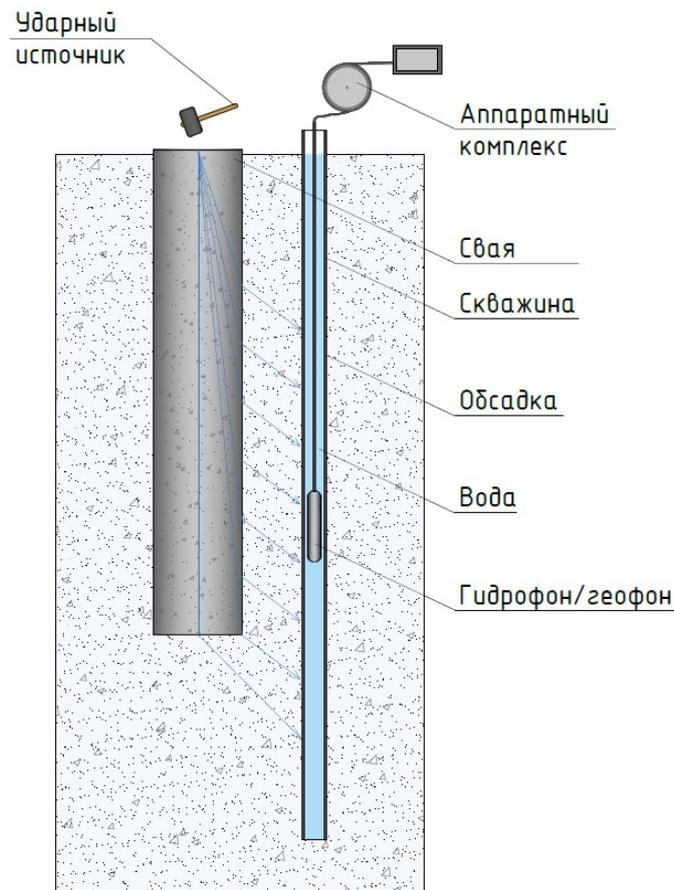


Рисунок 1.11 – Схема проведения испытаний параллельным сейсмическим методом

### Электромагнитные методы (Induction Field)

На сегодняшний день существуют несколько электромагнитных методов, предназначенных для контроля железобетонных конструкций, например, скважинная георадиолокация, импульсная рефлектометрия, метод сопротивлений [7, 24].

Один из таких методов Induction Field (Рисунок 1.12) также используется для определения неизвестной глубины заложения свайного фундамента и основан на обнаружении магнитного поля в ответ на колебательный ток, проходящий по стальному элементу [25]. Следовательно, чтобы этот метод работал, свая должна содержать электропроводящие материалы, для железобетонных свай этим материалом является арматурный каркас. Датчик помещается в скважину, расположенную рядом со свайей, и регистрирует изменение напряженности магнитного поля. При проведении исследования индукционного поля необходимо

установить электрический контакт с рассматриваемой свайей. Другой электрод должен располагаться на некотором расстоянии от сваи. Это может быть еще одна свая или арматура, находящаяся в грунте. Затем между этими двумя электродами пропускается колебательный ток. По длине сваи напряженность магнитного поля будет относительно сильной, однако она будет значительно снижена под пятой сваи. Это изменение напряженности магнитного поля используется для определения длины сваи.

Ограничения метода также заключаются в сложности и трудоемкости процесса. Самым строгим требованием при использовании метода индукционного поля является то, что внутри сваи должен быть металлический арматурный каркас, проходящий непрерывно по всей длине сваи. В случае неполного армирования сваи, невозможно достоверно определить ее длину. Кроме того, для проведения обследования сваи данным методом необходимо наличие дополнительной обсаженной скважины и наличие электрического контакта с металлом [104].

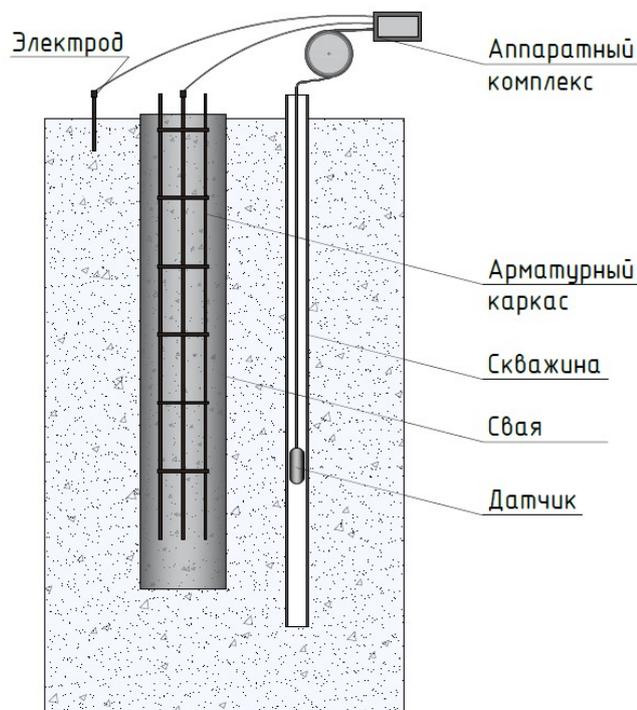


Рисунок 1.12 – Схема проведения испытаний методом Induction Field  
**Односкважинный ультразвуковой картаж (single-hole sonic logging)**

Метод односкважинного ультразвукового каротажа разработан для оценки сплошности железобетонных свайных фундаментов и особенно подходит для свай малого диаметра, где установка двух труб может быть нецелесообразной (Рисунок 1.13).

Для проведения испытания требуется одна заполненная водой трубка, прикрепленная к арматурному каркасу. Источник и приемник погружаются на забой трубки и поднимаются. Данный метод измеряет время прихода преломленных волн между излучателем и зондом-приемником. Испытание проводится, как правило, минимум через семь дней с момента бетонирования сваи. Для корректного применения метода трубки должны быть изготовлены из полимерных материалов, так как при использовании металлических трубок, могут возникать значительные помехи, которые влияют на интерпретацию полученных сигналов [58].

Недостатки метода заключаются в трудоемкости процесса, связанного с установлением трубок доступа до момента бетонирования сваи. В случае отслоения трубки от бетона проведение испытания невозможно. Также ввиду небольшой области контролирования сваи, не превышающей десяти сантиметров от трубки, точность метода является невысокой. Метод также не позволяет контролировать наличие в свае шеек или утолщений [95].

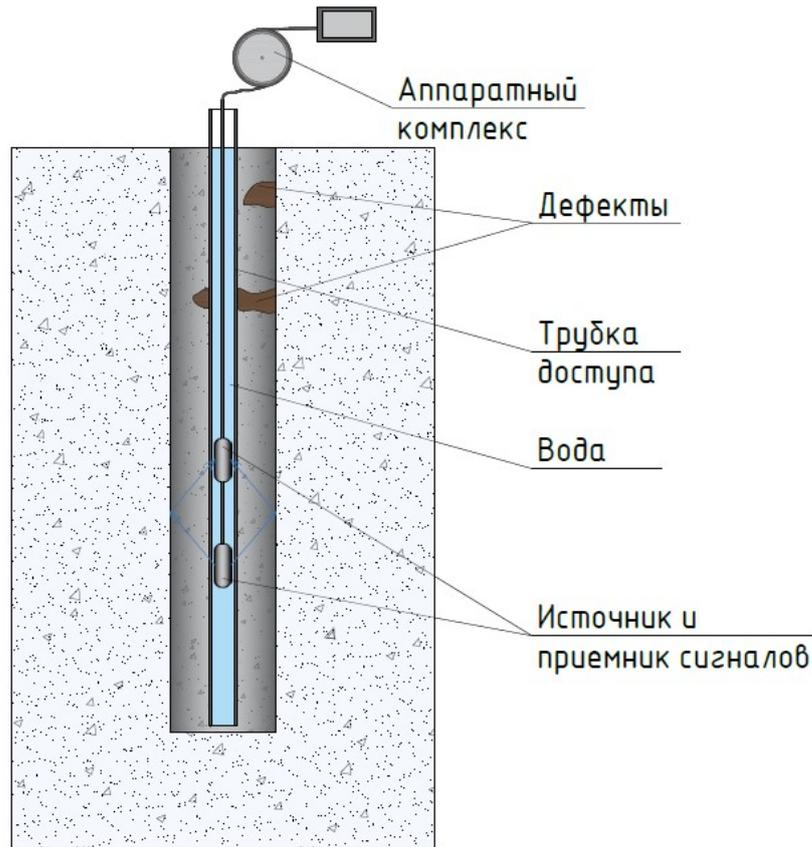


Рисунок 1.13 – Схема проведения испытаний односкважинным ультразвуковым каротажем

#### 4. Межскважинный ультразвуковой метод (crosshole ultrasonic logging)

Межскважинный ультразвуковой метод разработан для оценки длины и сплошности буровых и буронабивных свай. Метод осуществляется с использованием пар трубок из ПВХ или стали, наполненных водой.

Межскважинный ультразвуковой метод основан на анализе скорости и затухании ультразвуковых волн, которые распространяются между установленными трубами доступа [61].

Трубы доступа из стали или ПВХ прикрепляются к внутренней стороне арматурного каркаса до момента бетонирования скважины. Требуются как минимум две трубки доступа, обычно имеющие внутренний диаметр 50 мм. Особую осторожность следует соблюдать при установке труб, чтобы избежать отслоения между ними и бетоном, что может привести к полной потере сигнала. Одна из трубок используется для источника, а другая — для приемника сигнала,

которые синхронно перемещаются вдоль трубок (Рисунок 1.14). Показания снимаются с постоянными и регулярными интервалами. Дефекты наблюдаются как уменьшение времени пробега ультразвуковой волны от источника к приемнику. Важно, чтобы трубы были вертикальными, а расстояние между ними было постоянным по всей их длине. Кроме того, нераспознанные различия в расстоянии между трубами могут привести к ложной интерпретации дефектов.

Данный метод широко используется при контроле сплошности свай и с высокой точностью позволяет локализовать дефекты, но также обладает рядом ограничений. Трубы доступа должны быть установлены до укладки бетона, и необходимо соблюдать особую осторожность, чтобы избежать отслоения труб между бетоном и трубами. Следует следить за установлением трубок в строго вертикальное положение, так как в случае их отклонения от вертикали, время прихода сигнала может увеличиться, что повлияет на определение скорости в свае. Данное явление может быть интерпретировано как наличие дефекта или включения ввиду локального снижения скорости. Условия отслоения труб могут возникать при использовании труб из ПВХ выше уровня грунтовых вод. Также одним из существенных недостатков является тот факт, что дефекты можно выявить только на пути ультразвуковой волны. Например, в случае установления двух трубок доступа в арматурном каркасе, в плоскости их измерения сплошность свай может быть не нарушена, но в другой плоскости могут находиться дефекты. Помимо этого, при использовании данного метода нельзя контролировать наличие уширений [23, 88].

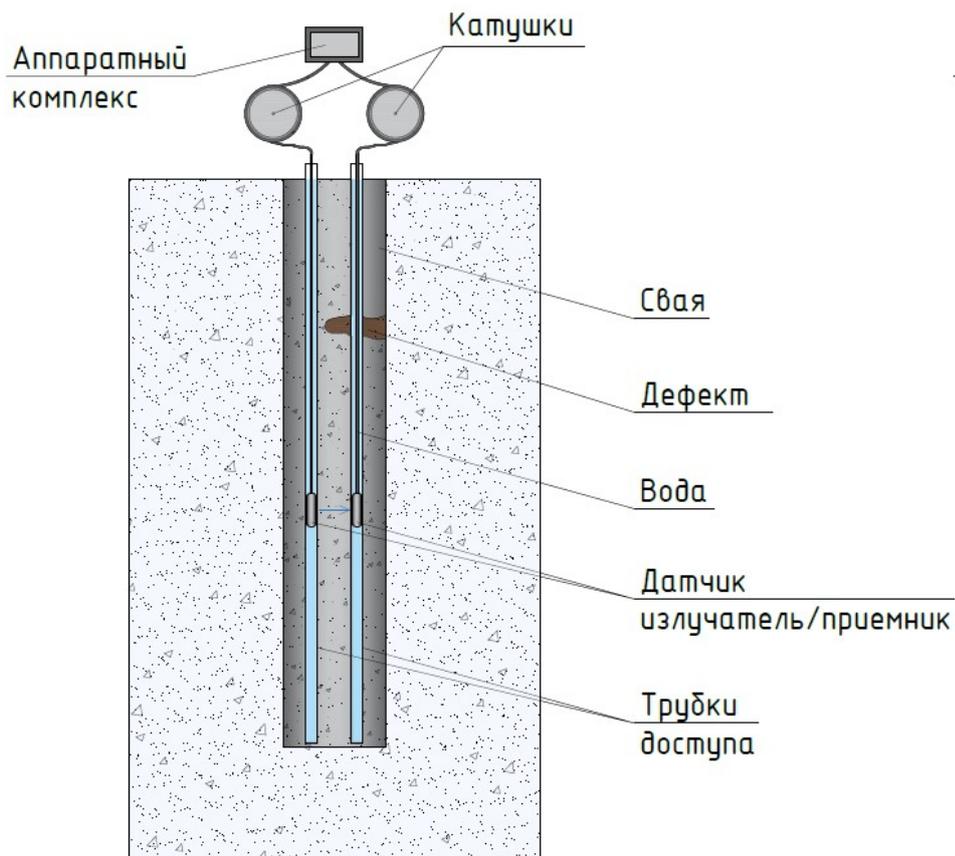


Рисунок 1.14 – Схема проведения испытаний межскважинным ультразвуковым методом

### Метод межскважинной ультразвуковой томографии

Метод межскважинной ультразвуковой томографии применяется в нефтяной и инженерной геофизике для изучения характеристик массивов горных пород, но также используется для контроля сплошности буровых и буронабивных свай [6, 55]. Сбор данных включает в себя сканирование интересующей области с множеством комбинаций местоположений источника и приемника (Рисунок 1.15).

Источник и приемник погружаются до нижней отметки труб доступа, далее положение источника фиксируется, а приемник поднимается вверх, регистрируя сигналы с заданным шагом. После фиксации данных на первой заданной отметке, источник перемещается на следующую отметку. Аналогичным образом происходит регистрация сигналов при помощи приемника. Исследование повторяется до тех пор, пока не будут включены все возможные комбинации источник-приемник [29].

Использование метода позволяет оценить геометрические размеры, месторасположение дефекта и его физические свойства.

Основной недостаток метода заключается в требовании сбора больших объемов данных. Также в случае необходимости построения трехмерного изображения, требуется специализированное программное обеспечение для трехмерного анализа данных.

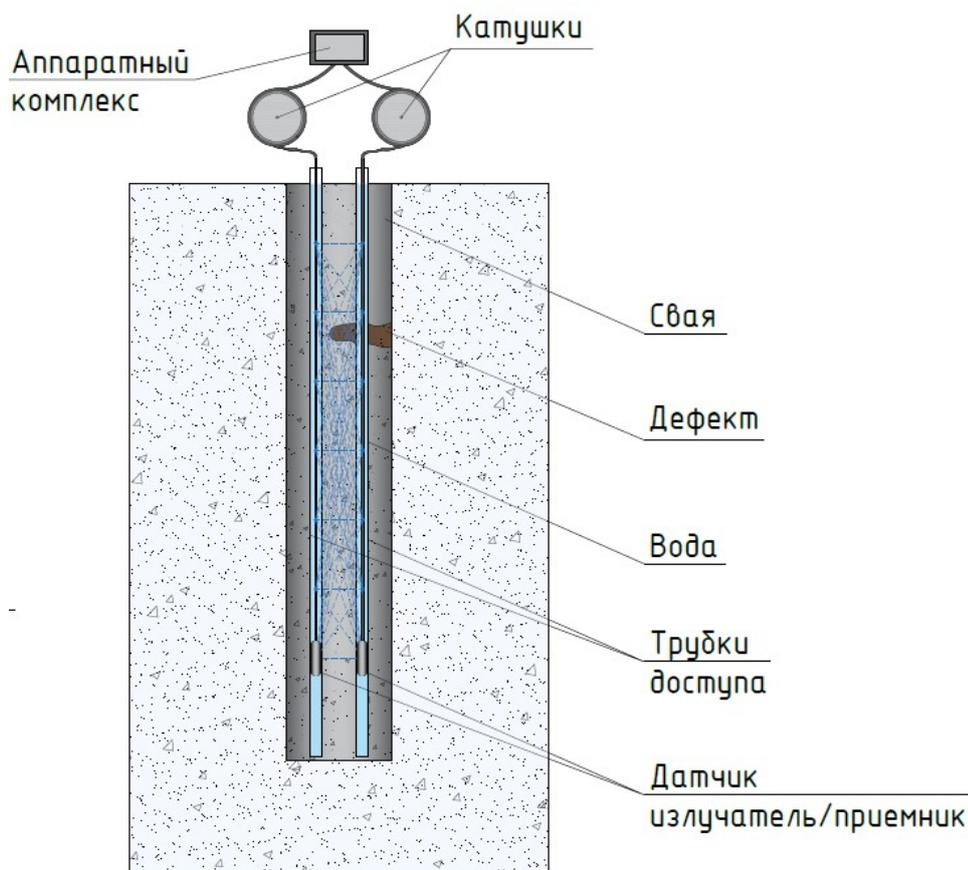


Рисунок 1.15 – Схема проведения испытаний методом межскважинной ультразвуковой томографии

### **Радиометрический метод (Gamma-Gamma Density Logging)**

Радиометрический метод гамма-гамма предназначен для контроля сплошности свайных фундаментов и основан на количестве регистрируемых приемным элементом частиц в единицу времени. Метод также реализуется при помощи трубок из ПВХ или стали, прикрепленных к арматурному каркасу, по которым движутся источник и приемник частиц.

Принцип действия метода основан на измерении интенсивности отраженного излучения или обратного рассеяния от материала вокруг скважины. Интенсивность обратного рассеяния во многом зависит от плотности материала. Следовательно, изменения в интенсивности обратного рассеяния указывают на изменения в плотности [62, 82].

Гамма-гамма каротаж можно использовать в качестве сравнительной формы тестирования, когда изменения интенсивности обратного рассеяния указывают на аномалии качества бетона (Рисунок 1.16). Если аномалии должны быть определены количественно или требуются фактические значения плотности, значения обратного гамма-рассеяния должны быть сопоставлены с эталонным значением плотности. Для этого изготавливается отдельный испытательный блок из того же бетона, с трубой доступа из того же материала, что и те, которые используются в конструкции, подлежащей испытанию. Гамма-гамма-тесты, проводимые в контролируемых условиях на испытательном блоке, затем обеспечивают эталонные измерения, на основании которых можно рассчитать коэффициент, связывающий интенсивность гамма-излучения с плотностью [69, 104].

Ненарушенная сплошность бетона в теле сваи приведет к почти непрерывному выравниванию данных. Аномальные зоны - из-за включений грунта, плохого бетона или пустот – характеризуются большим отклонением данных с низкой плотностью.

Ограничения методики заключаются в небольшом участке контроля сваи, а также в невозможности точно локализовать дефект, а только его наличие.

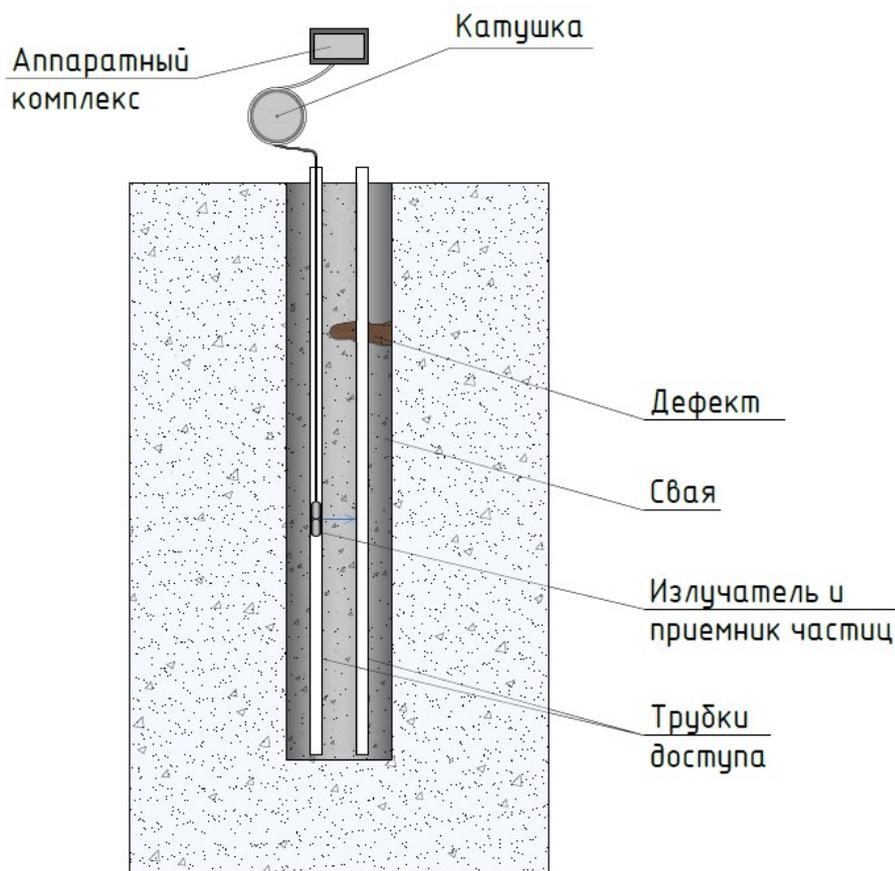


Рисунок 1.16 – Схема проведения испытаний радиометрическим методом

## 1.6 Выводы по Главе 1

Выполненный анализ инженерно-геологического строения Санкт-Петербурга, технологий возведения свай и возникающих дефектов, а также методов неразрушающего контроля, позволяет сформулировать цель и поставить задачи диссертационной работы:

**Целью данной работы является** расширение перечня и повышение достоверности выявления дефектов, возникающих в железобетонных сваях при их изготовлении в производственных условиях и формировании в слабых водонасыщенных грунтах путем совершенствования принципов и методов получения и обработки сигналов сейсмоакустического метода неразрушающего контроля.

Для реализации поставленной цели в диссертации были решены следующие **задачи:**

1. Анализ процессов образования дефектов при возведении и эксплуатации свай в слабых водонасыщенных грунтах и методов оценки их сплошности и длины.

2. Разработка искусственных дефектов и моделирование процессов получения и обработки сигналов при сейсмоакустическом контроле свай в условиях слабых водонасыщенных грунтов.

3. Разработка технологии изготовления и аттестации испытательных образцов свай с искусственными дефектами в составе полигона для проведения верификации методик контроля.

4. Разработка и верификация методики контроля свайных фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах, повышающей достоверность данных, полученных при использовании сейсмоакустического метода, на основе вейвлет-преобразования и классификаторов с использованием искусственных нейронных сетей.

5. Экспериментальное исследование разработанной методики с использованием испытательных образцов с искусственными дефектами и двухсекционных свай заводского изготовления.

6. Практическое применение и валидация методики в реальных условиях применения свай.

## ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (ИСПЫТАНИЙ) ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ

### 2.1 Общие сведения

Как было описано выше, сейсмоакустический метод основан на анализе распространения акустических волн в теле сваи. Он соответствует стандарту ASTM D5882 и другим международным нормам и в настоящее время является одним из методов испытаний свай по оценке длины и сплошности. При испытаниях (неразрушающем контроле) упругие волны возбуждаются ударом молотка по оголовку сваи и распространяются вниз вдоль тела сваи, отражаясь от границ участков с отличающимися значениями акустического импеданса, которые соответствуют пяте сваи и имеющимся дефектам (Рисунок 2.1) [60, 75, 89].

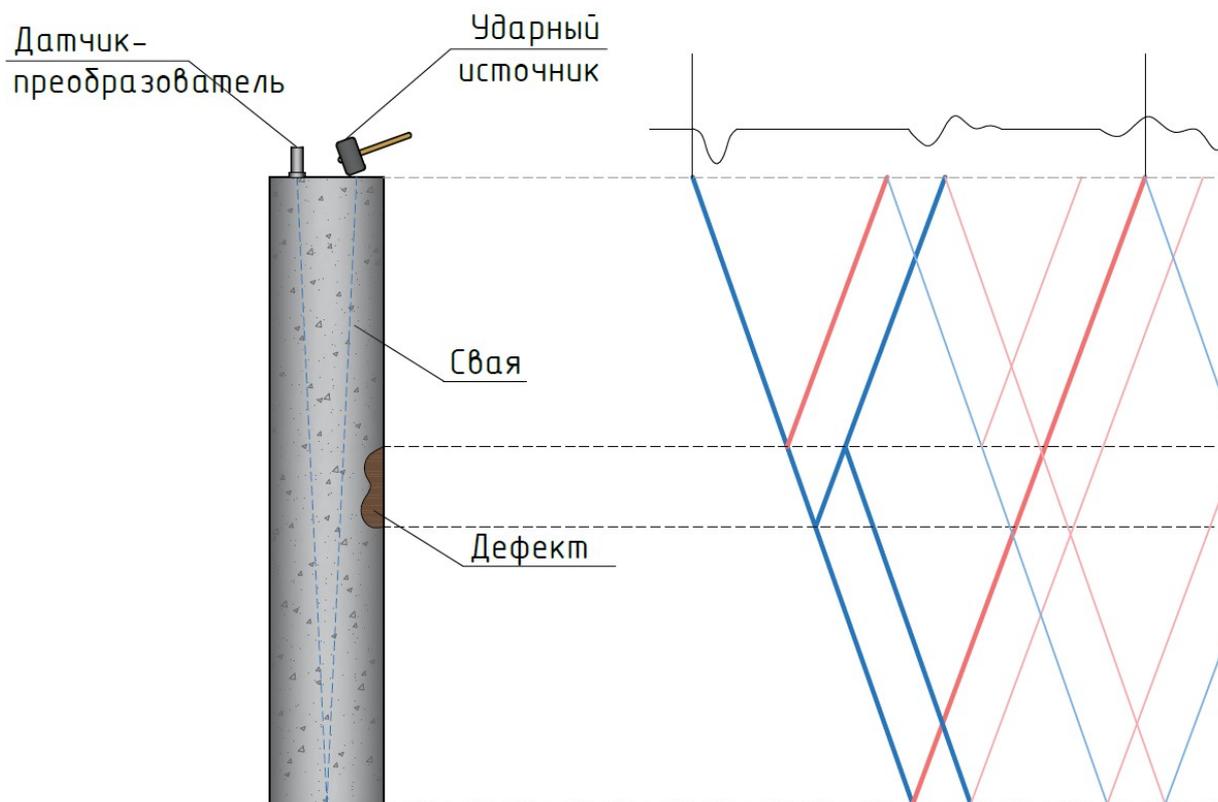


Рисунок 2.1 – Схема испытаний свай с использованием сейсмоакустического метода. Красными и синими линиями условно показаны траектории распространения волн

В соответствии с ASTM D5882 испытания должны проводиться не ранее, чем через семь дней после бетонирования скважины или, когда бетон в теле сваи наберет не менее 75% прочности. Перед проведением испытания необходимо получить доступ к оголовку сваи, который должен быть высушен, очищен от пыли и грязи, и гладко зашлифован. Необходимо выбрать не менее трех точек возбуждения сигнала, по каждой из которых будет нанесен удар не менее пяти раз [39, 60].

Ускорение или скорость перемещения частиц в оголовке сваи после нанесения удара, распространения акустических колебаний в теле сваи и возможных отражений, регистрируется как функция времени пьезоэлектрическим преобразователем, устанавливаемым на оголовок сваи (Рисунок 2.1). Для создания надежного акустического контакта между пьезоэлектрическим преобразователем и оголовком сваи необходимо нанести специальную смазку. Далее сигналы с выхода пьезоэлектрического преобразователя обрабатываются и подготавливаются к процедуре интерпретации.

Параметры сигналов можно анализировать как во временной, так и в частотной области [53, 66, 76, 81]. Операции обработки обычно включают интегрирование, нормализацию, усиление, фильтрацию и усреднение. Расстояние  $L$  до отражателя (длина сваи или расстояние до дефекта) рассчитывается по формуле (2.1):

$$L = \frac{V \cdot t}{2} , \quad (2.1)$$

где  $V$  – скорость волны, принимаемая за постоянную величину (обычно 3600 – 4400 м/с для бетонных свай);

$t$  – время прохождения волны от оголовка сваи до отражателя и обратно.

Чтобы установить сплошность сваи и определить ее длину, обработанные сигналы анализируются вместе с записями в журналах буровых и бетонных работ, инженерно-геологическим разрезом и другой соответствующей информацией (идентифицируются особенности сигнала, связанные с отражениями от пяты сваи

или дефектов). Четко выраженное отражение от пяты и достаточно устойчивый сигнал являются признаками бездефектной сваи [38, 40, 98].

Сейсмоакустический метод является относительно быстрым и недорогим, однако обладает рядом ограничений [56]:

- Метод обычно не выявляет незначительные включения и изменения поперечного сечения менее 25% [77].

- На надежность испытаний большое влияние оказывает соотношение длины сваи к ее диаметру и акустические свойства окружающего грунта. Более точно определить длину сваи можно в случае, если соотношение длины к диаметру находится в пределах от 20 (в твердых грунтах) и до 60 (в очень мягких грунтах) [57].

- Длина сваи и расстояние до выявленных аномалий линейно зависят от предполагаемого значения скорости волны, что может привести к ошибкам около 10 %.

- В большинстве случаев метод испытаний не позволяет судить о сплошности сваи ниже первой значимой аномалии сигнала.

- Информация об испытаниях верхней части сваи ограничена, и метод не позволяет обнаружить дефекты вблизи пяты на расстоянии около 10 % от длины сваи [63].

## 2.2. Теоретические основы метода применительно к рассматриваемой задаче

В случае выполнения условий согласно выражению (2.2) [26, 50]:

$$\frac{D}{L} \ll 1 \text{ и } \frac{D}{\lambda} \ll 1, \quad (2.2)$$

где  $D$  - диаметр сваи;

$L$  – длина сваи;

$\lambda$  – длина волны возбужденного ударным источником акустического импульса.

Физическая основа метода строится на теории распространения продольной деформации в тонких линейно-упругих стержнях.

Рассмотрим малый элемент стержня длиной  $\delta x$  с площадью поперечного сечения  $A$  (Рисунок 2.2).

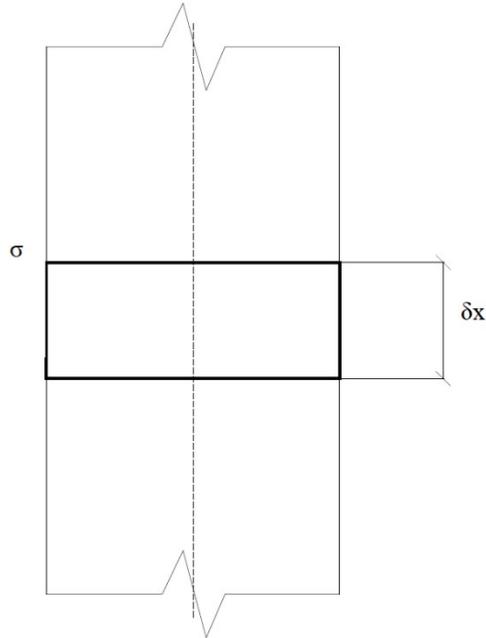


Рисунок 2.2 – Малый элемент линейно-упругого стержня

В верхней плоскости рассматриваемого элемента стержня напряжение равно  $\sigma$ , тогда с другой стороны элемента напряжение равно  $\sigma + (\partial\sigma/\partial x)\delta x$ . Далее, по второму закону Ньютона получим выражение (2.3):

$$\rho A \delta x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = A \frac{\partial \sigma}{\partial x} \delta x, \quad (2.3)$$

где  $\rho$  - плотность материала стержня (сваи);

отношение напряжения  $\sigma$  к деформации  $du/dx$  равно модулю упругости  $E$ .

Следовательно (2.3) можно записать в виде выражения (2.4):

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.4)$$

Из (2.4) следует, что стержневая скорость распространения упругой волны в свае [26, 36, 64] равна (2.5):

$$v_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.5)$$

В случае невыполнения условия длинного тонкого стержня, помимо продольных колебаний необходимо учитывать еще и поперечные. Образование

такого типа волнового поля в стержне обусловлено эффектом Пуассона. Один из способов учета данного эффекта заключается в выводе волновых уравнений, которые учитывают энергию поперечного движения частиц стержня. Поправки в данную теорию были внесены Рэлеем, предложившим учитывать слагаемое, отвечающее за поперечные движения частиц стержня. Предполагается, что поперечные деформации пропорциональны продольным [50].

Соответственно уравнение продольных колебаний будет иметь следующий вид (2.6) [31, 44]:

$$\rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - EF \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - v^2 \rho I_0 \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} = 0, \quad (2.6)$$

где  $I_0 = \iint_F (y^2 + z^2) dF$  – полярный момент инерции сечения;

$F$  – площадь поперечного сечения цилиндра

В теории Бишопа предлагается дополнительно учитывать потенциальную энергию сдвиговых деформаций. Следовательно, учет данного слагаемого приведет к следующему виду уравнения продольных колебаний стержня (2.7) [20]:

$$\rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - EF \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - v^2 \rho I_0 \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} + v^2 \mu I_0 \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = 0, \quad (2.7)$$

Упругая волна, возбужденная ударным источником в оголовке сваи, распространяется вдоль тела сваи и отражается на границах участков сваи с различными значениями акустического импеданса (дефекты, включения, низ сваи), который является параметром, характеризующим волновое сопротивление поперечного сечения сваи, вовлеченного в колебательный процесс (2.8) [56]:

$$Z = \rho \cdot v \cdot A, \quad (2.8)$$

где  $Z$  - акустический импеданс;

$\rho$  - плотность материала сваи;

$A$  - площадь поперечного сечения сваи.

Так как свая находится в окружающем ее грунтовом массиве, то передача усилия на грунт происходит за счет трения по боковой поверхности (висячие сваи). В процессе распространения упругой волны вдоль тела сваи, часть ее

энергии тратится на преодоление этого трения и поглощается вмещающей средой (грунтом), что приводит к затуханию по длине. Чем выше акустическая жесткость грунта и больше геометрические размеры свай, тем сильнее затухание [52].

Для проведения испытаний по оценке длины и сплошности свай необходимо использовать различные ударные источники, чтобы повысить достоверность интерпретации полученных данных. Обычно используется набор из нескольких молотков с различным весом и материалом насадки, которые возбуждают импульсы различной длительности.

Возбуждение импульсов меньшей длительности, которые соответствуют ударам легкими металлическими молотками, позволяют с большей вероятностью локализовать дефекты в теле свай. Однако сигналы, полученные при использовании таких молотков, зачастую обладают высокочастотной составляющей, обусловленным структурным шумом. В этом случае необходимо использовать дополнительные инструменты для обработки, которые помогают выделить полезный сигнал. Возбуждение импульсов большей длительности, соответствующих ударам тяжелыми киянками с резиновыми наконечниками, позволяет более достоверно выделить сигналы, отраженные от низа свай [84].

### **2.3 Модели искусственных дефектов железобетонных свайных фундаментов**

Естественные дефекты, возникающие при устройстве свай в грунте или в процессе их погружения, могут иметь различную форму и акустические характеристики, которые заранее не могут быть известны. Точная физическая реализация возникающих дефектов вызывает технические и технологические трудности, поэтому при проведении экспериментов и исследований реальные дефекты заменяются искусственными. Создание испытательных образцов (свай с искусственными дефектами) позволяет исследовать разрешающую способность поверхностного сейсмоакустического метода [84].

В Главе 1 были подробно описаны дефекты, возникающие в сваях заводского изготовления и сваях, устраиваемых в грунте. Для свай, устраиваемых в грунте, наиболее часто встречающимися дефектами являются размывание бетонной смеси и грунтовые включения. Для их имитации предлагается

использовать вставки из полистирола, который по сравнению с железобетоном обладает существенно более низкими акустическими характеристиками и может являться так называемым отражателем упругих волн.

В соответствии с требованиями выше указанной нормативной документации, представляется необходимым для имитации дефекта «грунтовое включение» искусственные дефекты изготавливать в форме вставок в виде прямоугольного параллелепипеда размерами  $150 \times 300 \times 100$  мм и  $150 \times 150 \times 100$  мм (Рисунок 2.3). Для имитации дефекта «размытие бетонной смеси» искусственный дефект изготавливается в виде цилиндрической вставки диаметром 250 мм и высотой 100 мм (Рисунок 2.4).

Все вставки крепятся к арматурному каркасу при помощи вязальной проволоки. Искусственный дефект типа «размытие бетонной смеси» изготавливается в зависимости от диаметра арматурного каркаса.

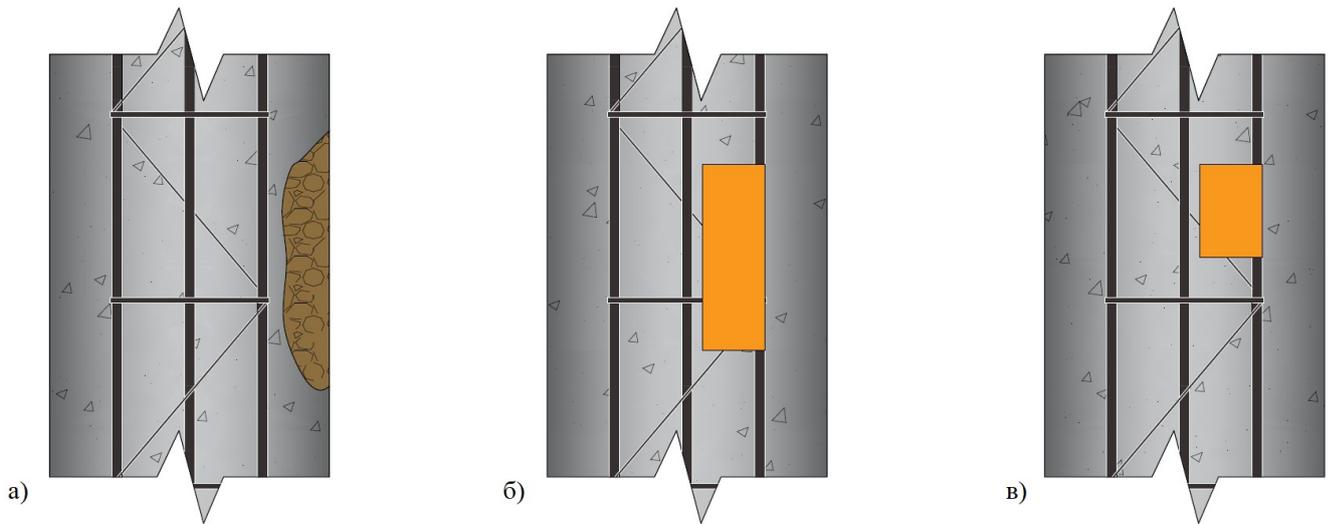


Рисунок 2.3 – Дефект «включение грунта»: а) естественный дефект; б) искусственный дефект размерами  $150 \times 300$  мм толщиной 100 мм; в) искусственный дефект размерами  $150 \times 150$  мм толщиной 100 мм

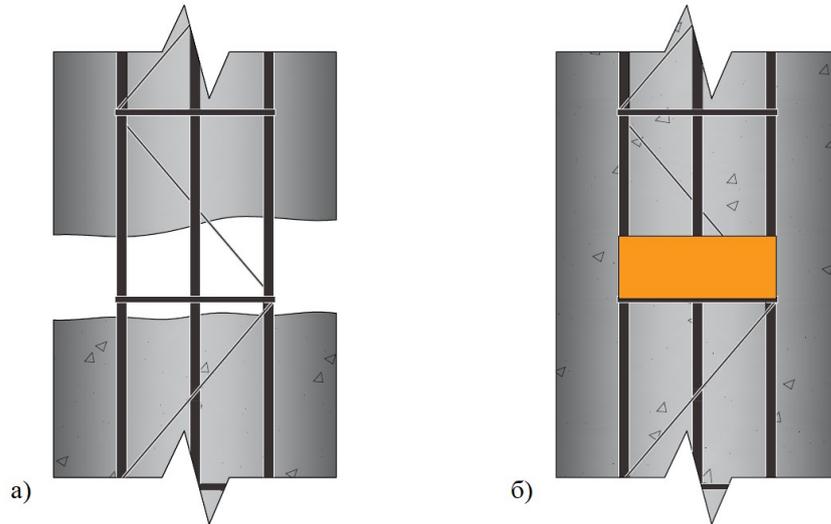


Рисунок 2.4 – Дефект «размытие бетонной смеси»: *а)* естественный дефект; *б)* искусственный дефект диаметром 250 мм и толщиной 100 мм

Наиболее распространенным стыком секций свай заводского изготовления, применяемых в слабых водонасыщенных грунтах, является сварной стык. Соединение секций свай со сварным стыком производится через накладки из листовой стали, которые привариваются к боковым поверхностям закладных деталей [11, 14, 45, 86].

В качестве имитации возможных дефектов такого типа стыка используется воздушная и песчаная прослойка между секциями (Рисунок 2.5).

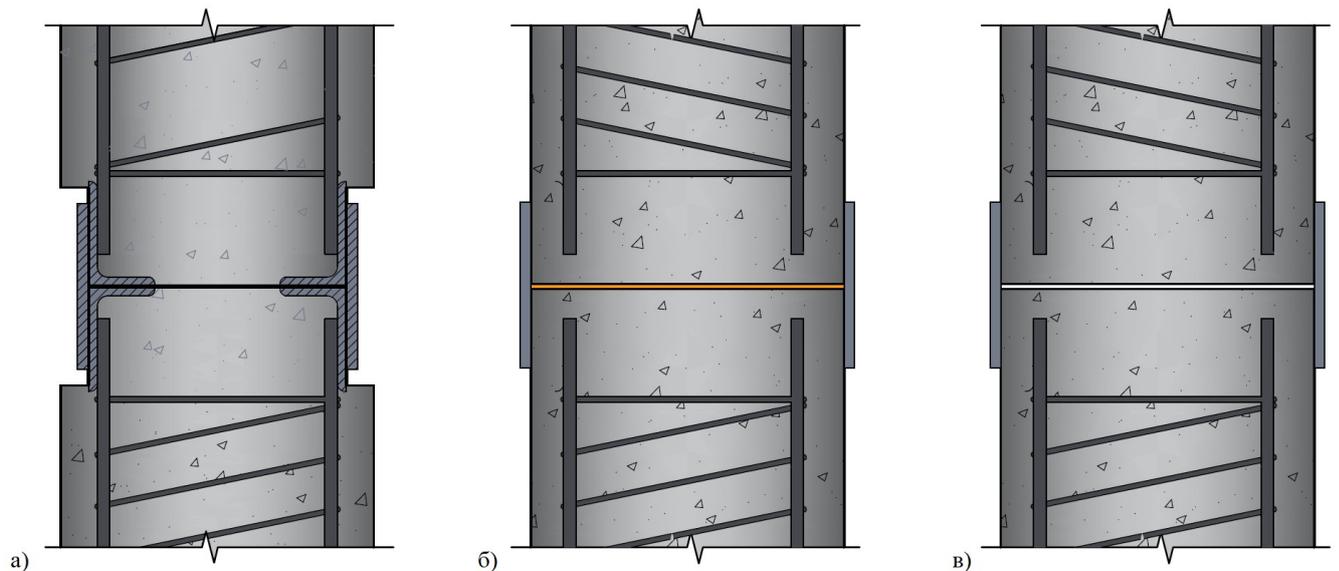


Рисунок 2.5 – Стык между секциями сваи заводского изготовления: *а)* конструктивный стык; *б)* имитатор дефекта - песчаная прослойка; *в)* имитатор дефекта - воздушная прослойка

## **2.4 Моделирование процесса формирования и распространения акустических колебаний и получения сигналов для свай с искусственными дефектами**

### **2.4.1 Общие положения моделирования процесса формирования и распространения акустических колебаний и получения сигналов для свай, устраиваемых в грунте**

Для изучения разрешающей способности сейсмоакустического метода, а именно его способности выявлять указанные выше дефекты в монолитных сваях, а также локализовать зону стыка и определять длину свай заводского изготовления, была проведена серия расчетов (численного моделирования) с использованием метода конечных элементов, созданного в программном обеспечении COMSOL Multiphysics 5.3 [53, 81].

Расчеты производились с помощью высокопроизводительной рабочей станции, основанной на двух процессорах Intel Xeon (в общей сложности 24 ядра) и содержащей 512 Гб оперативной памяти. Такие ресурсы были необходимы ввиду реализации полномасштабного численного моделирования распространения упругих волн в линейной упругой среде в осесимметричной постановке во временной области.

Геометрические характеристики численных моделей свай с искусственными дефектами представлены на Рисунке 2.6, на котором отсутствует лишь вмещающая сваю среда, представляющая собой слой песка толщиной в полтора раза больше поперечного размера сваи, что достаточно для эффективного рассеяния в нем акустических колебаний из сваи.

Физические параметры материалов модели: плотность, скорости распространения продольных и поперечных волн, параметры  $\alpha$  и  $\beta$  рэлеевской модели затухания приведены в Таблице 2.1 [65, 100, 102].

Источник акустических колебаний представляет собой небольшую область диаметром 30 мм в оголовке сваи на ее оси. Граничное условие в области источника задавалось в виде вертикально действующей силы (2.9), изменяющейся по закону [51]:

$$F = -Ae^{-\left(2\pi\frac{(t-0.5T)}{T}\right)^2} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \left(0.5 - 0.5\cos\left(2\pi\frac{t}{T}\right)\right), \text{ if } t < T \\ 0, \text{ if } t \geq T \end{array} \right\}, \quad (2.9)$$

где  $A$  – максимальная величина действующей силы;

$T$ – длительность импульса.

Использование огибающей в виде окна Ханнинга необходимо для исключения потенциальных ошибок численного расчета, связанных с появлением бесконечных производных на первом шаге расчетов. Принимаемый акустический сигнал усреднялся по участку оголовка сваи диаметром 25 мм, отстоящим от ее оси на 75 мм.

Размер конечных элементов выбран с учетом характерных размеров геометрии модели и длины волны в материале таким образом, чтобы обеспечить ошибку расчета не более 0.5 %. Шаг по времени составил 1 мкс (в соответствии с критерием Куранта – Фридрикса – Леви).

Свойства материалов, заданные в численных моделях, представлены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики материалов

Параметры	Бетон	Песок	Воздух	Полистирол
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2400	1500	1275	1060
Скорость продольной волны, м/с	4000	600	330	2350
Скорость поперечной волны, м/с	2450	200	–	1120
Коэффициенты Рэлея: $\alpha$ , s <sup>-1</sup> ; $\beta$ , s	20; 10 <sup>-8</sup>	200; 10 <sup>-7</sup>	–	2000; 10 <sup>-6</sup>

Предварительные расчеты проводились для четырех типов искусственных дефектов в сваях, изготавливаемых в грунте. Модель 1 повторила бездефектную сваю (Рисунок 2.6а). Модель 2–сваю с искусственным дефектом из полистирола

диаметром 250 мм (Рисунок 2.6б), который покрывает 30% площади поперечного сечения сваи. На Модели 3 (Рисунок 2.6в) показана модель буронабивной сваи с вертикальным искусственным дефектом из полистирола с размерами 150×300 мм. На Модели 4 (Рисунок 2.6г) представлена модель сваи с искусственным дефектом из полистирола с размерами 150×150 мм. Высота (толщина) каждого искусственного дефекта составляла 100 мм, диаметр сваи 450 мм, а общая длина сваи 3 м.

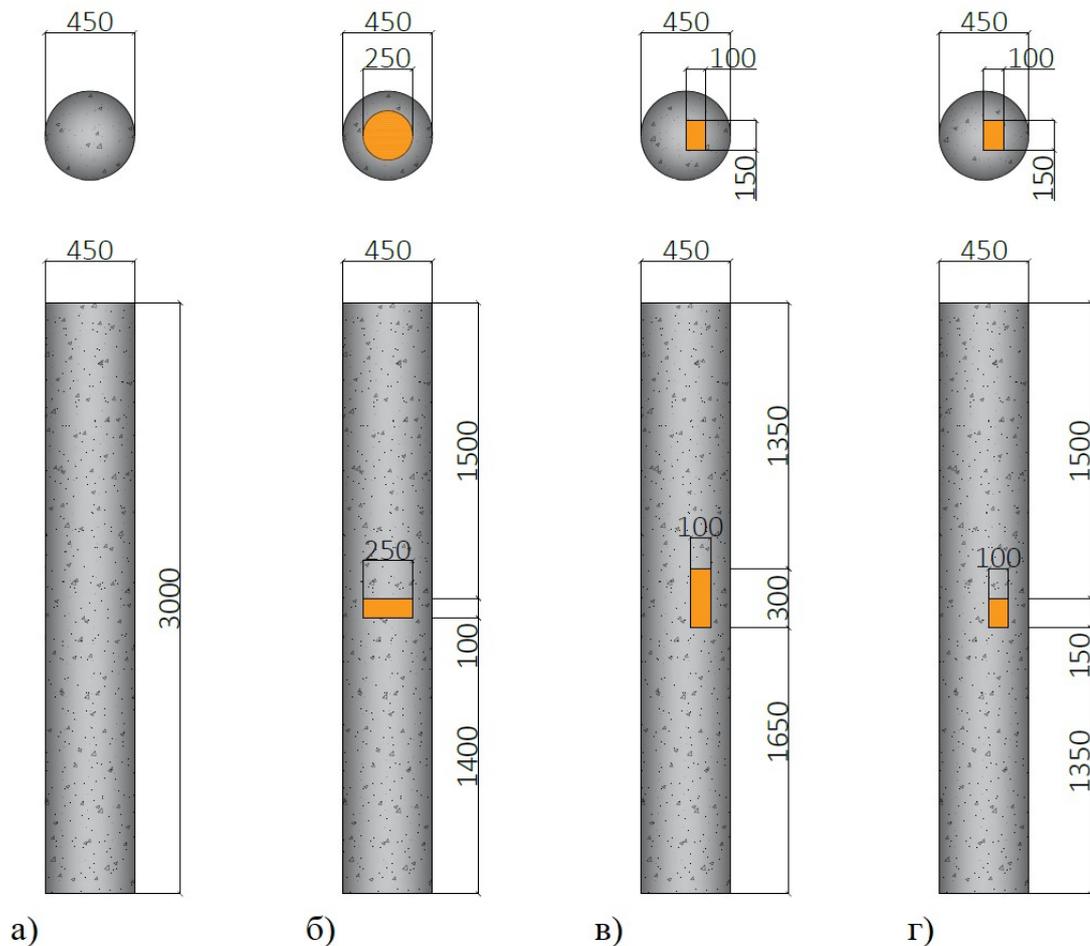


Рисунок 2.6 – Геометрические характеристики моделей монолитных железобетонных свай: а – бездефектная свая (Модель 1), б - с искусственным дефектом диаметром 250 мм и толщиной 100 мм (Модель 2), в - с искусственным дефектом 100х150х300 мм (Модель 3), г - с искусственным дефектом 100х150х150 мм (Модель 4)

На Рисунке 2.7 показаны результаты расчета сигналов пьезоэлектрических преобразователей для всех моделей при длительности импульса входной силы 0.5, 0.75, 1 и 1.2 мс. Каждый синтетический сигнал демонстрирует четкое отражение

от пята сваи, однако разрешение при различных длительностях импульсов источника значительно отличается. Низкочастотные сигналы нечувствительны к искусственным дефектам в теле сваи, в то время как высокочастотные возбуждения приводят к заметным отражениям от искусственных дефектов в случае покрытия дефектом 30% поперечного сечения сваи (Модель 2). Дефекты размерами 150×300 мм (Модель 3) и 150×150 мм (Модель 4) не обнаруживаются при использовании низкочастотного возбуждения сигнала. При использовании высокочастотного возбуждения сигнала появляется малозаметное отражение в области расположения дефекта, которое не может быть однозначно интерпретировано.

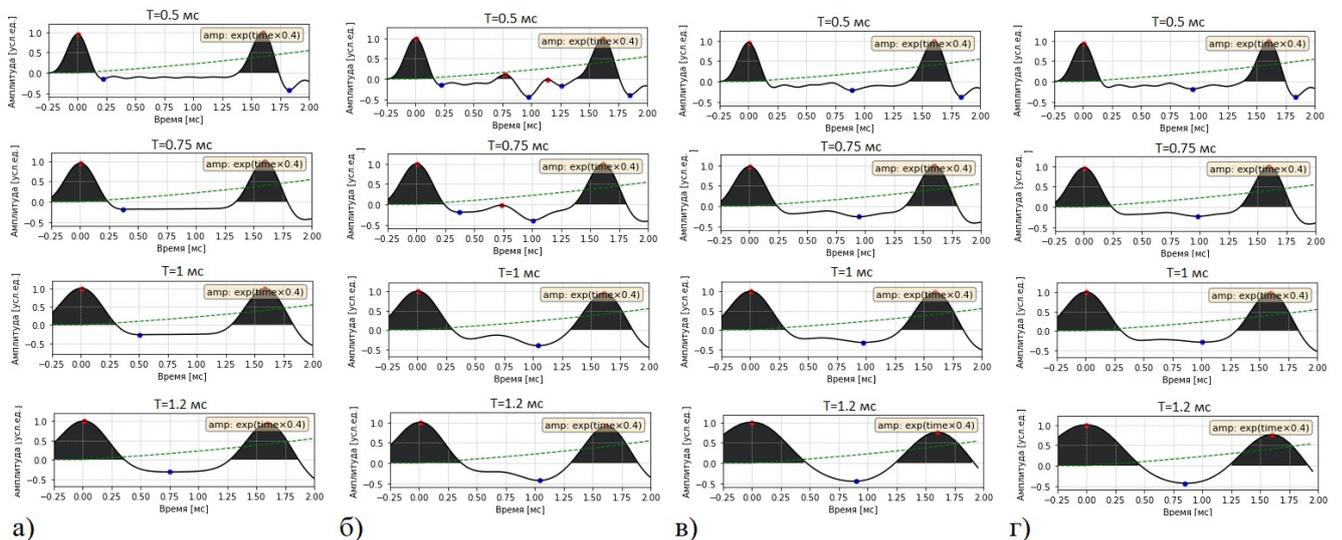


Рисунок 2.7 – Результаты расчета сигналов акустического пьезопреобразователя (численного моделирования) для моделей монолитных железобетонных свай с искусственными дефектами: а – бездефектная свая (Модель 1), б - с искусственным дефектом диаметром 250 мм и толщиной 100 мм (Модель 2), в - с искусственным дефектом 100x150x300 мм (Модель 3), г - с искусственным дефектом 100x150x150 мм (Модель 4)

#### 2.4.2 Моделирование процесса формирования и распространения акустических колебаний и получения сигналов для свай с искусственными дефектами различной формы и площади

Для исследования чувствительности и возможности выявления дефектов в монолитных сваях с использованием сейсмоакустического метода были

выполнены дополнительные четыре серии расчетов для свай с искусственными дефектами, форма которых представлена на Рисунке 2.9. Каждая серия для конкретного искусственного дефекта в свою очередь состояла из 18 расчетов с различной длительностью импульса входной силы от 0.36 до 1.25 мс. Различные входные импульсы формировались ударами молотков разного веса с отличающимися материалами насадок, либо и того, и другого. На Рисунке 2.8 показаны входные импульсы силы шести выбранных длительностей (заданных уравнением, определенным в предыдущем разделе) и их соответствующие амплитудные спектры [41].

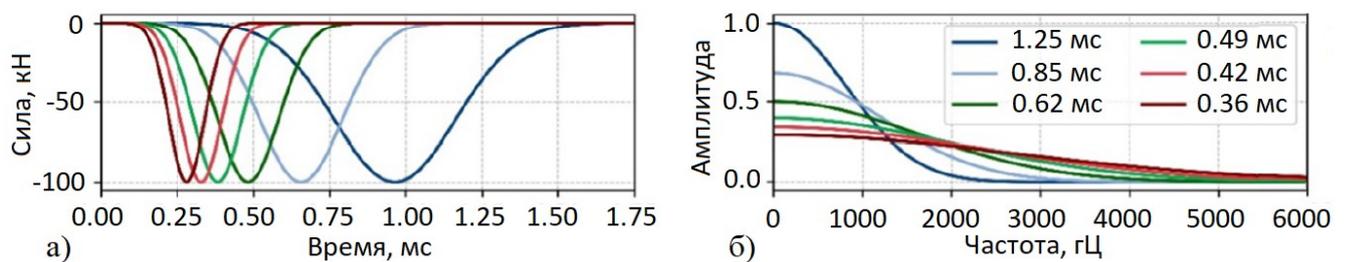


Рисунок 2.8 – Входные импульсы, моделирующие удары различных молотков для шести различных длительностей импульса с различным частотным составом: *а* - сигналы внешней вертикальной силы в виде гауссовых импульсов, модулированных окном Ханнинга, *б* - их соответствующие амплитудные спектры

Расчеты проводились для четырех видов свай с искусственными дефектами. Первый вид повторил бездефектную сваю (Рисунок 2.9*а*). Второй повторил сваю с дефектом из полистирола диаметром 250 мм (Рисунок 2.9*б*), который покрывает 30% площади поперечного сечения сваи. Третий вид (Рисунок 2.9*в*) соответствует буронабивной свае с полной потерей защитного слоя, смоделированной искусственным дефектом из полистирола с внутренним диаметром 250 мм, который занимает 70% площади поперечного сечения. Четвертый вид соответствует свае с повреждением бетонного покрытия, моделируемым искусственным дефектом из полистирола, который покрывает ту же площадь, что и дефект второго вида – 30%. Высота (толщина) каждого искусственного дефекта составляла 100 мм. Расстояние от верха сваи до дефектов 1550 мм.

На Рисунке 2.9 также показаны результаты моделирования – сигналы акустического пьезопреобразователя для всех видов свай с искусственными дефектами при длительности импульса входной силы 0.36, 0.42, 0.49, 0.62, 0.85 и 1.25 мс, соответственно. Хотя каждый синтетический сигнал демонстрирует четкое отражение от пяты сваи, разрешение различных импульсов источника значительно различается. Низкочастотные акустические сигналы нечувствительны к дефектам в теле сваи, в то время как высокочастотные возбуждения приводят к отражениям от дефектов. Как и следовало ожидать, дефекты, покрывающие большую площадь поперечного сечения сваи, приводят к более отчетливым аномалиям сигнала. Важно отметить, что короткие входные импульсы также приводят к периодическим изменениям амплитуды сигнала, которые не связаны со сплошностью сваи.

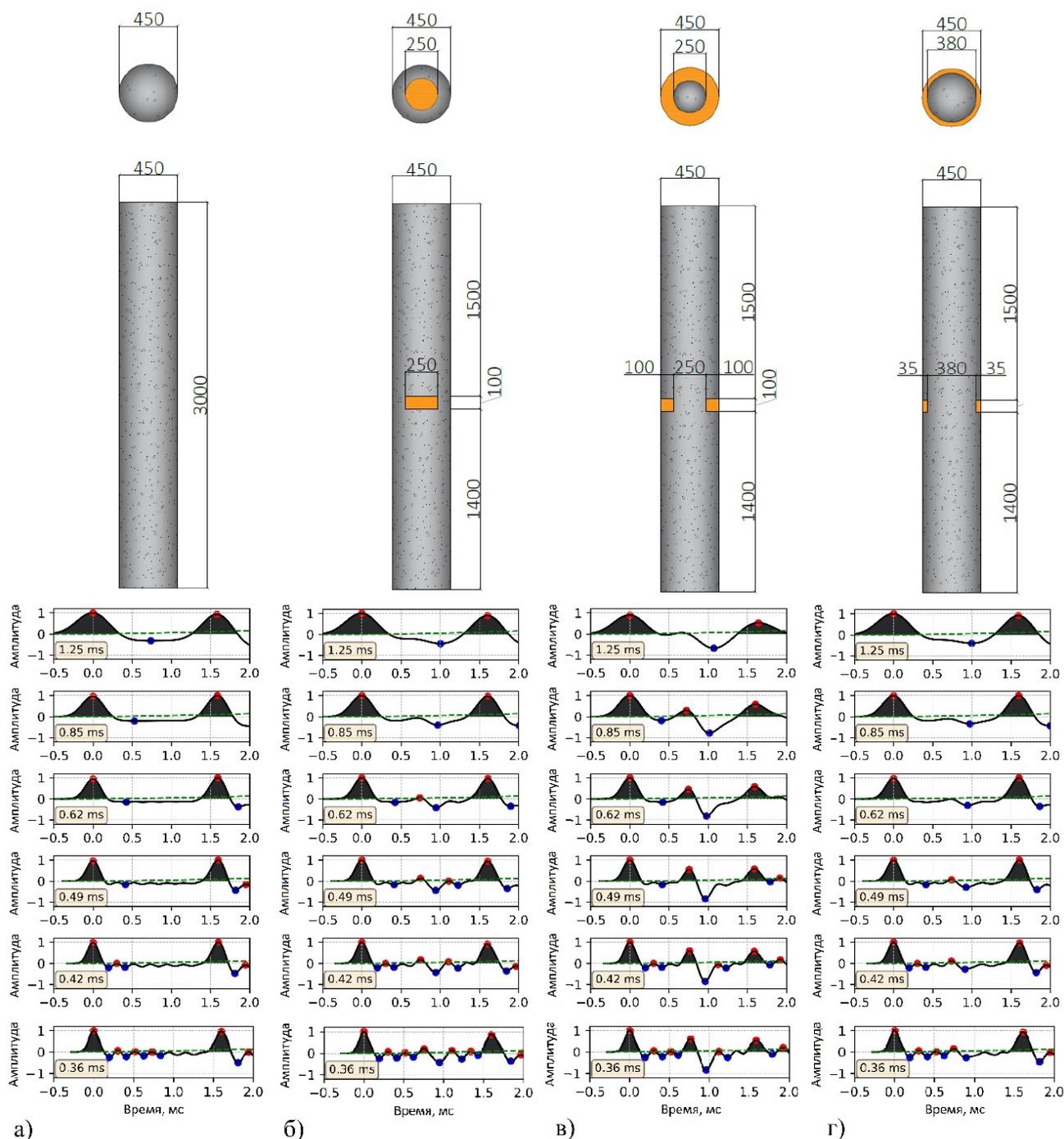


Рисунок 2.9 – Результаты численного моделирования процесса формирования и распространения акустических колебаний и получения сигналов для свай с искусственными дефектами различной формы и площади при длительностях импульса входной силы 0.36, 0.42, 0.49, 0.62, 0.85 и 1.25 мс. Моделей свай с искусственными дефектами и соответствующие сигналы пьезоакустического преобразователя: *а* - бездефектная свая, *б* – свая с искусственным дефектом диаметром 250 мм и толщиной 100 мм, *в* – свая с полной потерей защитного слоя, *г* – свая с повреждением защитного слоя

### **2.4.3 Моделирование процесса формирования и распространения акустических колебаний и получения сигналов для свай с искусственными дефектами на разной глубине**

Чтобы определить разрешающую способность сейсмоакустического метода для обнаружения дефектов, расположенных вблизи вершины сваи, численное моделирование было выполнено для четырех схем расположения свай с искусственными дефектами на разной глубине. Искусственный дефект диаметром 200 мм и 200 мм толщиной, изготовленный из полистирола был расположен в оголовке сваи (Рисунок 2.10а) на глубине -200 мм (Рисунок 2.10б), -500 мм (Рисунок 2.10в) и -2000 мм (Рисунок 2.10г). Моделирование для каждой схемы было выполнено для длительностей импульса входной силы 0.36, 0.42, 0.49, 0.62, 0.85 и 1.25 мс.

Результаты моделирования показывают, что искусственный дефект, расположенный в верхней части сваи, не обнаруживается при возбуждении низкочастотной волны, но генерирует периодические изменения сигнала большой амплитуды при использовании коротких входных импульсов (Рисунок 2.10а). Искусственный дефект на глубине 200 мм приводит к несколько неожиданным результатам, которые выглядели одинаково для всех длительностей входных импульсов (Рисунок 2.10б). Синтетические сигналы показывают положительные и отрицательные аномалии, которые могут быть неверно интерпретированы как искусственный дефект на глубине около 1,6–2 м при реальных испытаниях. Это можно объяснить трехмерными искажениями распространения полусферической волны в верхней части сваи. Результаты для искусственного дефекта на глубине 500 мм показывают, что дефект распознается при использовании коротких входных импульсов и не обнаруживается при возбуждении низкочастотными волнами (Рисунок 2.10в). Искусственный дефект, расположенный на глубине 2 м, четко идентифицируется во всех случаях (Рисунок 2.10г). На этой глубине дефект находится в дальней зоне для всех входных импульсов, и распространение волны можно приближенно описать с помощью одномерной линейной теории.

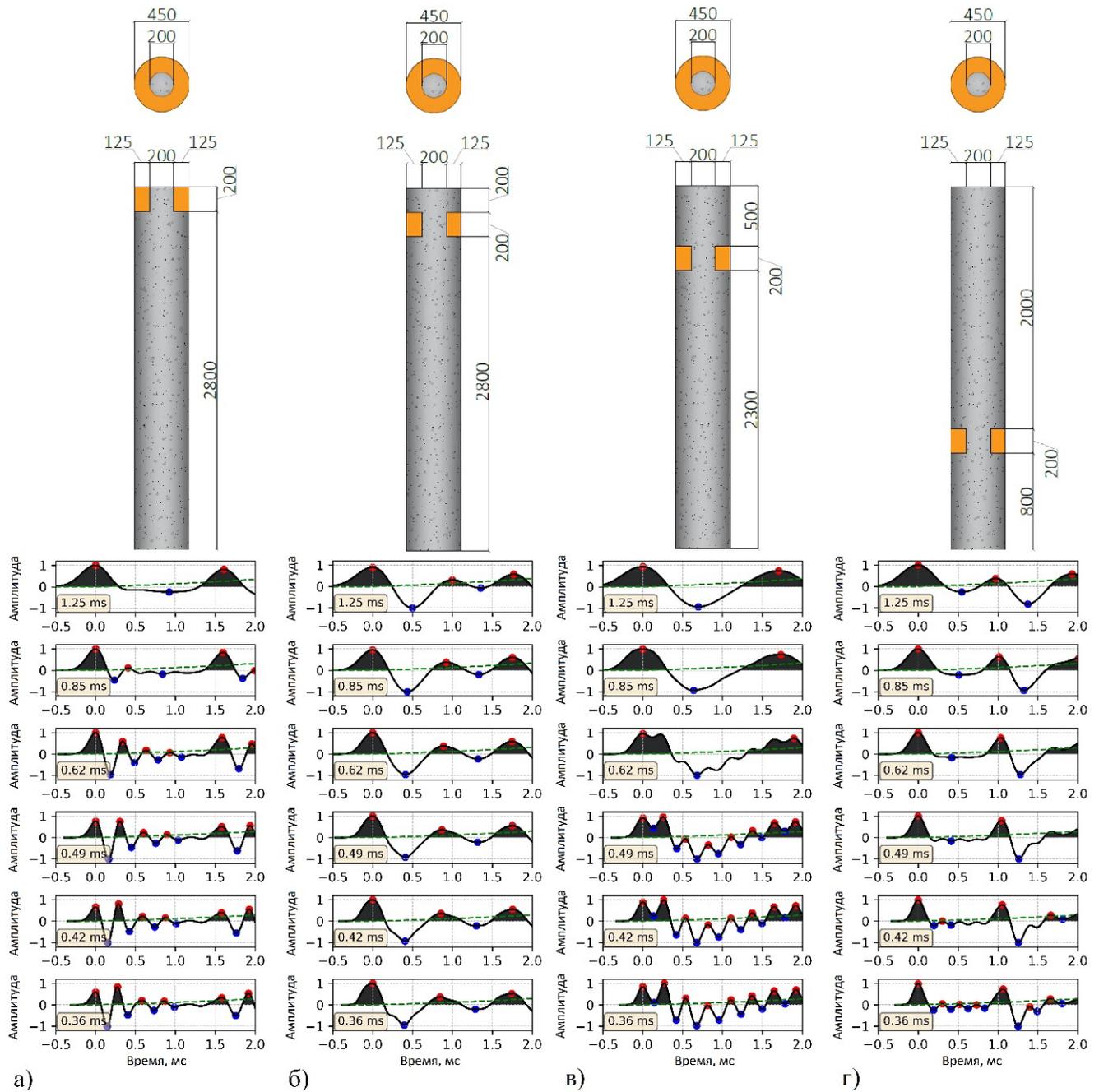


Рисунок 2.10 – Результаты численного моделирования процесса формирования и распространения акустических колебаний и получения сигналов для свай с искусственными дефектами, расположенным на разной глубине.

Модели свай с искусственными дефектами и соответствующие сигналы пьезоакустического преобразователя для свай с вершиной дефекта, расположенной: а) в головке сваи; б) на глубине 200 мм; в) на глубине 500 мм; г) на глубине 2000 мм

Моделирование показывает, что обнаруживаемость дефекта зависит не только от его размера, физических свойств и длительности входного импульса, но и от его местоположения. Дефекты, расположенные вблизи вершины сваи, могут

попасть в ближнюю зону источника и привести к ошибочным выводам о сплошности свай. Периодические изменения сигнала, зарегистрированные с помощью коротких входных импульсов и вызванные дефектами, могут быть ошибочно приняты за шум во время анализа реальных данных.

#### 2.4.4 Моделирование процесса формирования и распространения акустических колебаний и получения сигналов для свай заводского изготовления

Для исследования чувствительности и возможности выявления дефектов в сваях заводского изготовления с использованием сейсмоакустического метода было выполнено четыре серии расчетов для четырех моделей свай заводского изготовления с тремя вариантами зоны стыка, описанными выше [86].

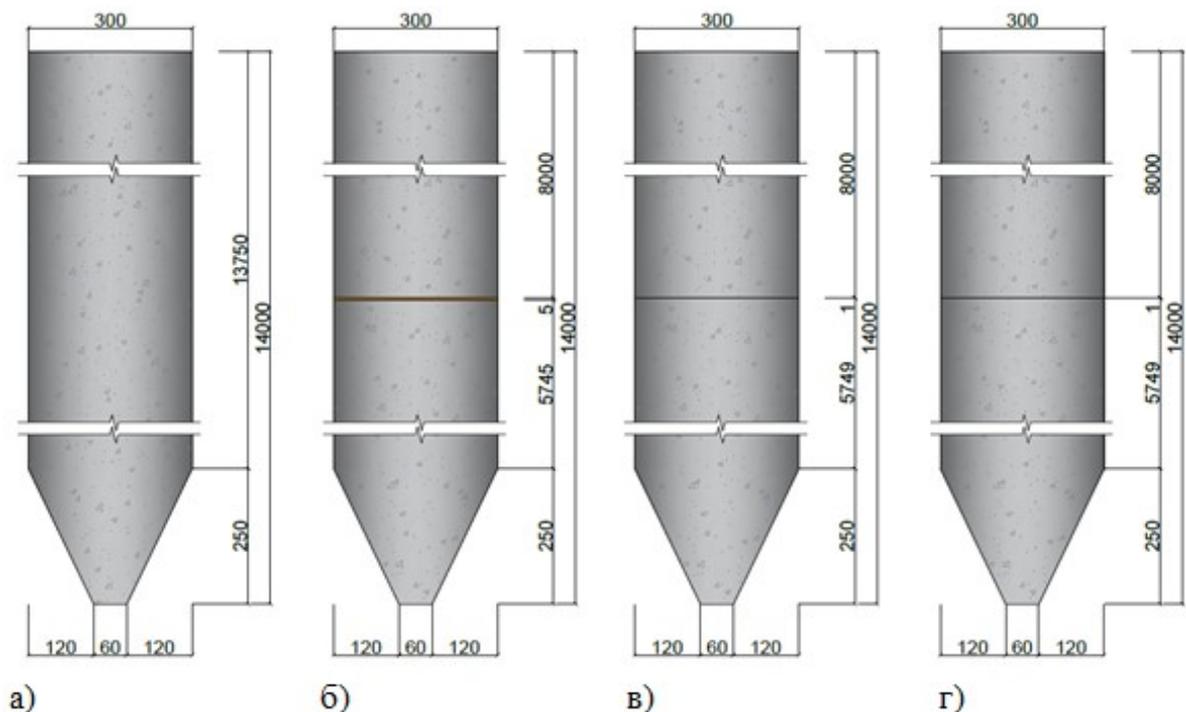


Рисунок 2.11 – Модели свай заводского изготовления и контактные условия зоны стыка: *а)* односекционная свая заводского изготовления (Модель 5); *б)* модель с песчаной прослойкой толщиной 5 мм (Модель 6); *в)* модель с песчаной прослойкой толщиной 1 мм (Модель 7); *г)* Модель с воздушной прослойкой толщиной 5 мм (Модель 8)

Условия зоны стыка подбирались таким образом, чтобы определить разрешающую способность сейсмоакустического метода и его возможности при определении длин секций и локализации стыка свай заводского изготовления.

Моделирование процессов сейсмоакустического метода для свай заводского изготовления для каждого вида контактных условий проводилось с длительностью входного импульса 0.5, 0.8, 1.2, 2 мс. Более короткие импульсы соответствуют ударам легких молотков с металлической насадкой, а более длинные - тяжелым киянкам с пластиковой насадкой.

Результаты моделирования показывают, что длина односекционной сваи точно определяется при любой длительности входного импульса (Рисунок 2.12а).

Результаты моделирования сваи с песчаной прослойкой толщиной 5 мм показывают четкое отражение через 7 мс после удара, что соответствует общей длине сваи 14 м (Рисунок 2.12б). При использовании различных длин входного импульса практически на каждом сигнале можно наблюдать отражение через 4 мс, что соответствует зоне стыка сваи, однако при длительности импульса 2 мс отражение нельзя однозначно идентифицировать.

Моделирование для искусственного дефекта песчаной прослойки толщиной 1 мм показало, что и при низкочастотном (длинных входных импульсах), и при высокочастотном возбуждении сигнала можно определить общую длину сваи, об этом свидетельствует отражение волны через 7 мс (Рисунок 2.12в). Что касается выявления контактной зоны секций сваи, то при более коротких входных импульсах, можно наблюдать слабое отражение через 4 мс. При более длинных входных импульсах (1.2 мс и 2 мс) отражение от зоны стыка секций не наблюдается, что может привести к ошибочной интерпретации сигнала. При визуальном анализе такого сигнала, сваю можно охарактеризовать как односекционную.

При испытании сваи с воздушной прослойкой на сейсмограмме (Рисунок 2.12г) можно наблюдать четкое отражение волны через 4 мс, также при использовании высокочастотного возбуждения сигнала (коротких входных импульсов) появляется отражение через 7 мс, что соответствует общей длине сваи

14 м. Помимо этого, отчетливо прослеживается кратное отражение от зоны стыка, которое можно наблюдать через 8 мс. На основе этого можно сделать вывод о том, что воздушная прослойка является значительным препятствием для прохождения акустической волны, в следствие чего корректное определение длин секций сваи является практически невозможным.

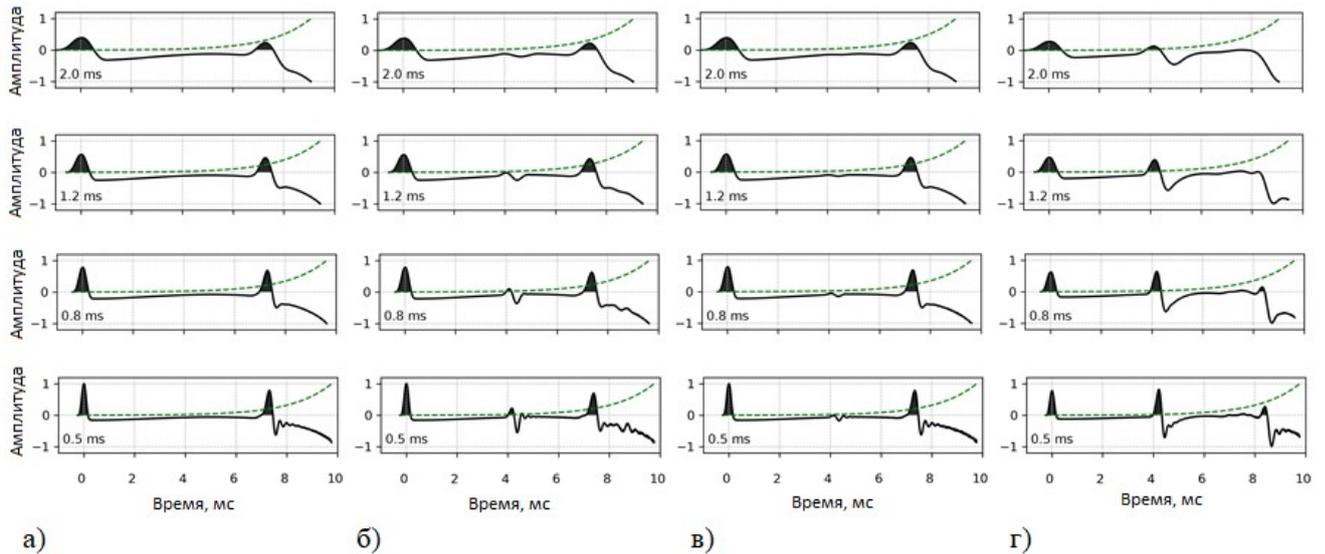


Рисунок 2.12 – Результаты численного моделирования процесса формирования и распространения акустических колебаний и получения сигналов при длительности входного импульса 0.5, 0.8, 1.2, 2 мс. Контактные условия и соответствующие сигналы: а) модель односекционной сваи заводского изготовления (Модель 5); б) модель сваи заводского изготовления с песчаной прослойкой толщиной 5 мм (Модель 6); в) модель сваи заводского изготовления с песчаной прослойкой толщиной 1 мм (Модель 7); г) модель сваи с воздушной прослойкой толщиной 1 мм (Модель 8)

На основе результатов моделирования процесса формирования и распространения акустических колебаний и получения сигналов для моделей свай заводского изготовления можно сделать следующие выводы:

- при более коротких входных импульсах (0.5 и 0.8 мс), которые соответствуют ударам легким молотком с твердым материалом насадки, обеспечиваются локализация зоны стыка и измерение общей длину сваи для Модели 6 и Модели 7.

- при возбуждении более длинных импульсов (1.2 и 2 мс), соответствующих ударам молотков различной массы с пластиковыми насадками, результаты по локализации зоны стыка Модели 6 являются неоднозначными, а для Модели 7 зона стыка не определяется;

- определить общую длину сваи для Модели 8 при помощи сейсмоакустического метода невозможно ввиду того, что контактные условия зоны стыка представлены в виде воздушной прослойки.

Для дальнейшего анализа и повышения достоверности интерпретации данных предлагается использовать комплексное вейвлет-преобразование.

## 2.5. Общие положения применения методики вейвлет-преобразования

Для фильтрации данных сейсмоакустического контроля наиболее широко применяются алгоритмы на основе преобразования Фурье. Преобразование Фурье позволяет получить интегральную оценку частотного состава сигнала и не позволяет локализовать изменения частотного состава во времени. Отсутствие возможности спектрального анализа локальных особенностей сигнала зачастую создает трудности в разделении полезного сигнала и помех, что может привести к ошибочной интерпретации данных [60].

Для повышения достоверности результатов интерпретации данных сейсмоакустического контроля предложено использовать инструменты вейвлет-преобразования, переводящего анализируемый сигнал из временного в частотно-временное представление [93, 103, 106]. Прямое непрерывное вейвлет-преобразование отображает рассматриваемый сигнал  $f(t) \in L^2(R)$  в функцию двух переменных  $a, b \in R, a > 0$  в выражении (2.10) [83, 90]:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (2.10)$$

где функция  $\psi(t)$  – материнский вейвлет;

\* – процедура комплексного сопряжения;

$a$  – параметр степени масштабирования (ширины) материнского вейвлета;

$b$  – параметр положения материнского вейвлета на оси времени.

Для того, чтобы успешно применить вейвлет-преобразование, важно подобрать оптимальную исходную вейвлет-функцию для выполнения анализа. В данном случае в качестве базовой (материнской) функции предлагается использовать комплексный вейвлет Морле (2.11) [91]:

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi B}} \exp^{-\frac{t^2}{B}} \exp^{i2\pi C t} \quad , \quad (2.11)$$

где параметр  $B$  – пропускная способность;

параметр  $C$  – центральная частота.

Варьируя данные параметры, можно настроить материнскую функцию для сигналов различного рода, а также регулировать частотно-временное разрешение вейвлет-преобразования. По результатам применения преобразования строится вейвлетограмма: плоское изображение в координатах «время-псевдо частота», где градациями цветовой шкалы показано распределение энергии коэффициентов вейвлет-преобразования. Чем точнее локальная особенность сигнала совпадает с полученной путем масштабирования и сдвига вейвлет-функцией, тем эффективнее она будет выделяться на вейвлетограмме.

Одним из главных отличий комплексного вейвлет-преобразования является наличие ортогональных мнимой и вещественной части. И если, используя только вещественную часть можно получить информацию об амплитуде только в одной области, то мнимая часть дает информацию также и о фазе, что позволяет повысить точность интерпретации сигнала (2.12):

$$\phi(a, b) = \arctan \left( \frac{W_I(a, b)}{W_R(a, b)} \right), \quad (2.12)$$

где  $\phi(a, b)$  - фаза,

$W_I(a, b)$  - мнимая часть;

$W_R(a, b)$  - вещественная часть.

При наличии в свае аномалий (дефектов) амплитуда акустического сигнала меняется, что можно наблюдать на амплитудном спектре. Параллельно с этим при наличии аномалий в объекте контроля происходят изменение фазы, которые

отслеживаются на фазовом спектре [91]. Анализируя момент изменения фазы, можно сделать вывод о сплошности конструкции, точно локализовать аномалию или же определить длину сваи. В данной работе предлагается использовать анализ фазы для определения оценки длины и сплошности монолитных свай, а также длин секций и локализации стыка свай заводского изготовления.

В первую очередь на спектре обозначаются точки концентрации энергии, которые соответствуют максимальному значению амплитуды. Далее линиями, например, Линия 1 и Линия 2, отмечаются места сдвига фазы с  $-\pi$  до  $\pi$ . В данном случае  $-\pi$  соответствует голубой цвет, а  $\pi$ -красный цвет. Для определения местоположения дефекта, длины сваи, а в данном случае локализации стыка, находится разница по времени между проведенными Линией 1 и Линией 2, далее по уравнению (2.1) определяется местоположение искомого параметра.

### 2.5.1 Применение методики вейвлет-преобразования для монолитных железобетонных свай

Применим методику комплексного вейвлет-преобразования для обработки сигналов монолитных железобетонных свай. На Рисунке 2.13 приведены результаты моделирования для бездефектной сваи. В качестве материнской функции выбран комплексный вейвлет Морле со значениями параметров ширины полосы пропускания 0.12 и центральной частоты 1.5. Места изменения фазы при любой длительности входного импульса четко прослеживаются в моменты 0 мс и 1.6 мс, что соответствует входному импульсу и отражению волны от пяты сваи на глубине 3 метра.

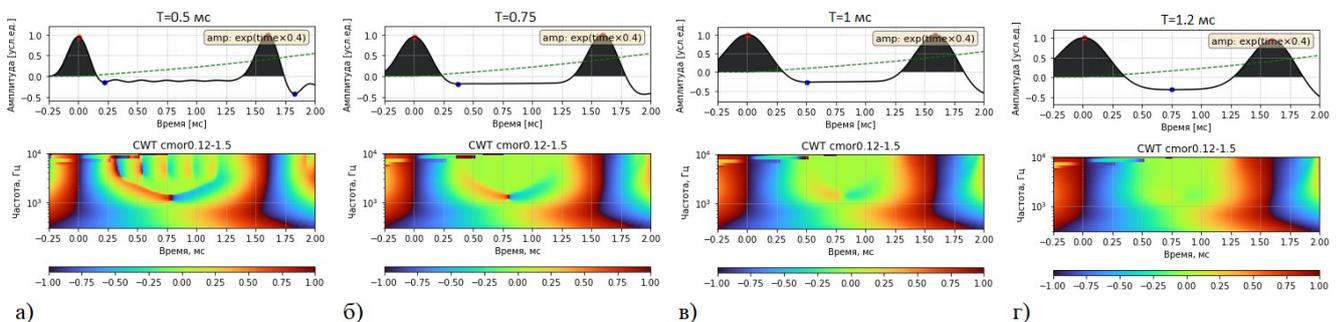


Рисунок 2.13 – Временное представление сигнала и фазовые спектры для бездефектной сваи с длительностью входного импульса: а) 0.5 мс; б) 0.75 мс; в) 1 мс; г) 1.2 мс

Проблема при моделировании данного вида искусственного дефекта диаметром 250 мм и толщиной 100 мм заключалась в невозможности локализации дефекта при использовании тяжелых молотков, которые соответствуют возбуждению более длинных входных импульсов. На полученных результатах видно, что при использовании более длинных входных импульсах точки концентрации энергии и места изменения фазы четко прослеживаются в моменты времени 0 мс и 1.6 мс, также заметно изменение фазы в момент 0.75 мс, что соответствует месторасположению дефекта (Рисунок 2.14-2.16). При возбуждении более коротких входных импульсов на временной диаграмме заметно небольшое отражение в месте локализации дефекта, которое не может быть однозначно интерпретировано. Однако после применения методики комплексного вейвлет-преобразования наблюдается отчетливая смена фазы в момент 0.75 мс.

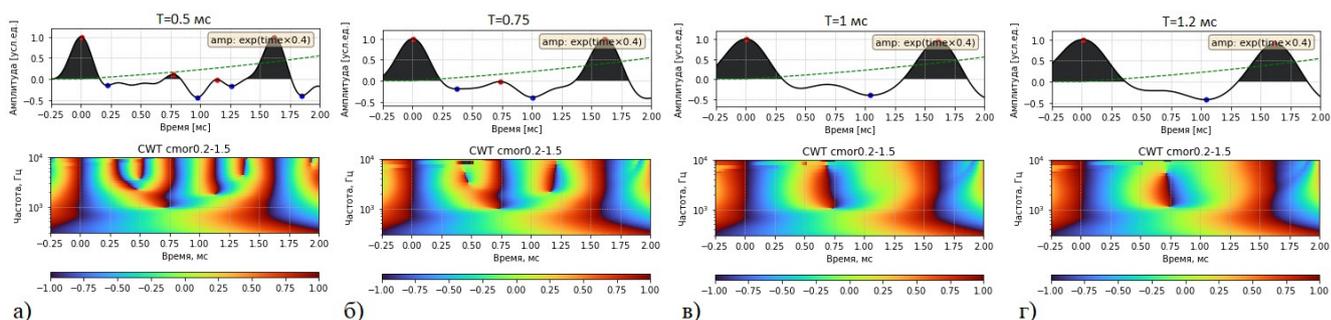


Рисунок 2.14 – Временное представление сигнала и фазовые спектры для свая с искусственным дефектом диаметром 250 мм и толщиной с 100 мм при длительности входного импульса: а) 0.5 мс; б) 0.75 мс; в) 1 мс; г) 1.2 мс

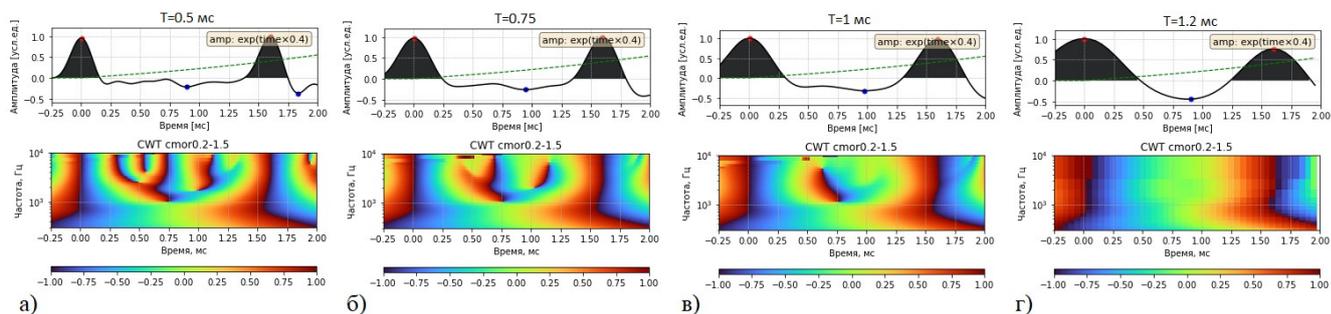


Рисунок 2.15 – Временное представление сигнала и фазовые спектры свая с искусственным дефектом 100x150x300 мм с длительностью входного импульса: а) 0.5 мс; б) 0.75 мс; в) 1 мс; г) 1.2 мс

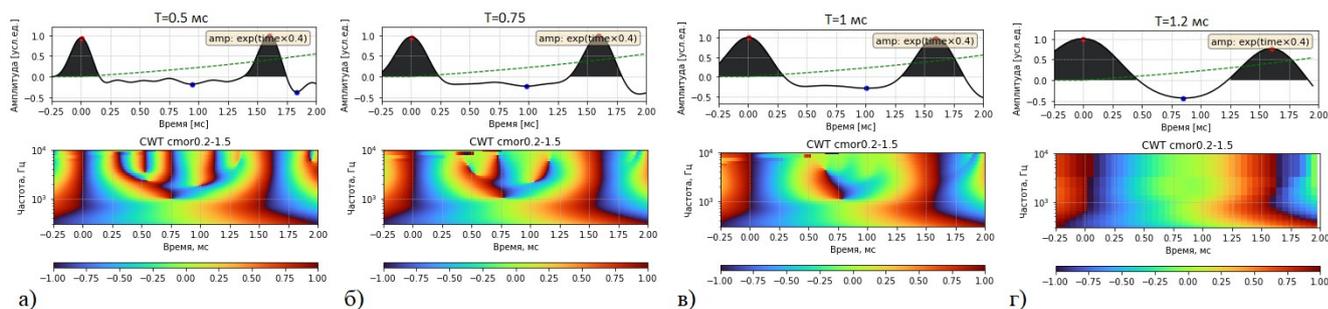


Рисунок 2.16 – Временное представление сигнала и фазовые спектры свай с искусственным дефектом 100x150x150 мм с длительностью входного импульса:

а) 0.5 мс; б) 0.75 мс; в) 1 мс; г) 1.2 мс

### 2.5.2 Применение методики вейвлет-преобразования для свай заводского изготовления

Применим методику комплексного вейвлет-преобразования для обработки сигналов свай заводского изготовления со следующими контактными условиями зоны стыка: односекционная свая заводского изготовления, песчаная прослойка толщиной 5 мм, песчаная прослойка толщиной 1 мм, воздушная прослойка толщиной 1 мм.

Ниже приведены результаты, иллюстрирующий применение методики комплексного вейвлет-преобразования для односекционной сваи заводского изготовления. Точки концентрации энергии и места изменения фазы при любой длительности входного импульса четко прослеживаются в моменты 0 мс и 7.5 мс, что соответствует входному импульсу и отражению волны от пяты сваи на глубине 14 м (Рисунок 2.17а-г).

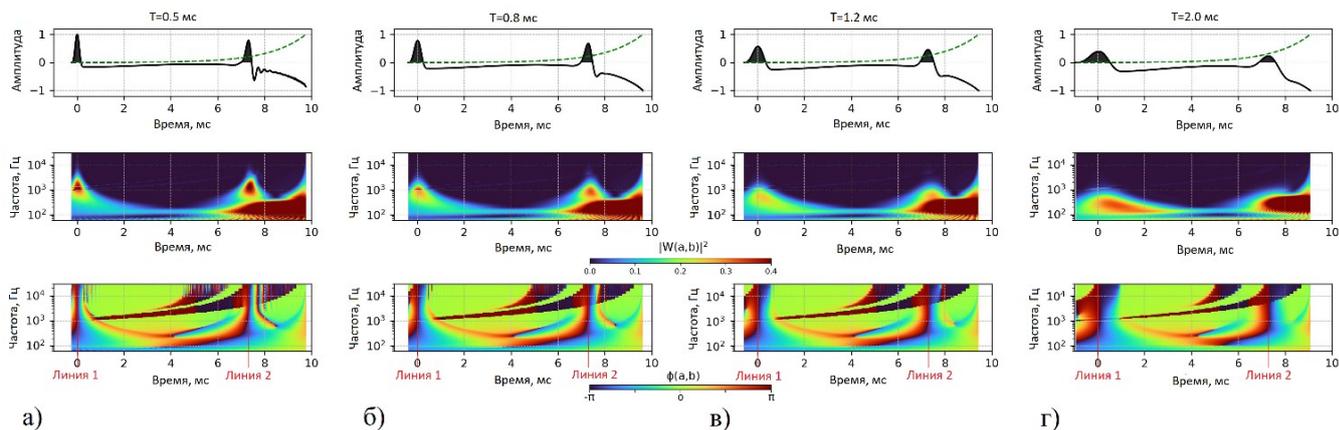


Рисунок 2.17 – Временное представление сигнала, фазовые спектры и точки концентрации энергии для односекционной сваи с длительностью входного импульса: а) 0.5 мс; б) 0.8 мс; в) 1.2 мс; г) 2 мс

Рассмотрим применение методики на численных моделях с различными условиями зоны стыка.

Для контактных условий типа песчаной прослойки толщиной 5 мм проблема заключалась в неоднозначных результатах интерпретации сигнала, а именно локализации стыка сваи, при использовании низкочастотного возбуждения (Рисунок 2.18а-г).

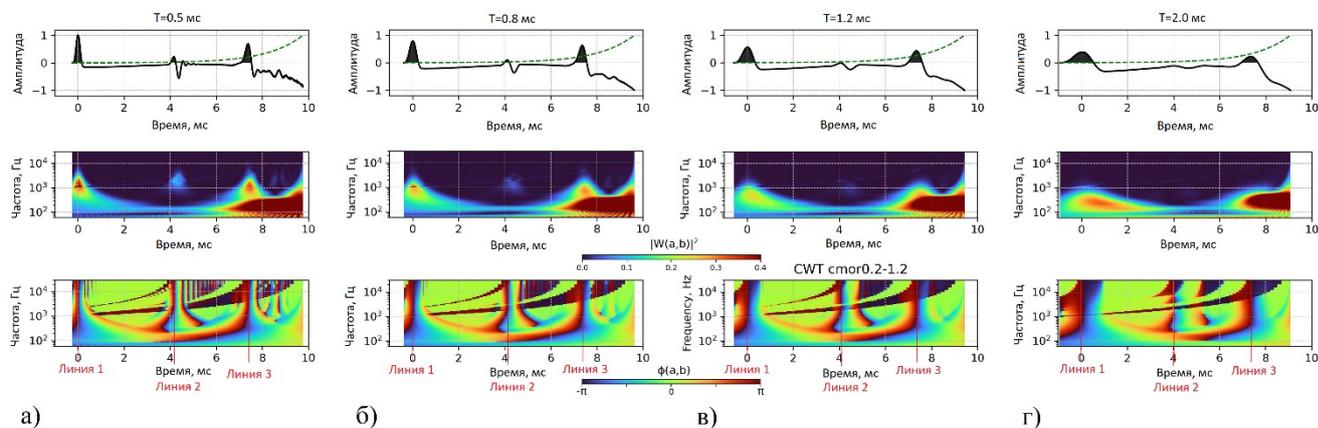


Рисунок 2.18 – Временное представление сигнала, фазовые спектры и точки концентрации энергии для песчаной прослойки толщиной 5 мм при длительности входного импульса: а) 0.5 мс; б) 0.8 мс; в) 1.2 мс; г) 2 мс

Применение методики комплексного вейвлет-преобразования показывает, что точки концентрации энергии четко отслеживаются в моменты 4.2 мс и 7.5 мс на сигналах при длительности входного импульса 0.5 и 0.8 мс. При более длительных входных импульсах (1.2 и 2 мс) точки концентрации энергии в зоне

стыка секций сваи отсутствуют. Анализируя фазовый спектр, можно наблюдать смену фазы в моменты 4.2 мс и 7.5 мс, что соответствует длине секции сваи 8 м и общей длине сваи 14 м.

При моделировании стыка секций песчаной прослойкой толщиной 1 мм основная проблема также заключалась в невозможности локализации зоны стыка при использовании низкочастотного возбуждения сигнала (Рисунок 2.19а-г). Применение методики ССВТ показывает, что точки концентрации энергии в области зоны стыка отсутствуют. При анализе фазового спектра сигналов при длительности входного импульса 0.5 мс, 0.8 мс и 1.2 мс отчетливо наблюдается смена фазы в моменты 4.2 мс и 7.5 мс, что соответствует длине секции 8 метров и общей длине сваи 14 метров. Анализируя фазовый спектр сигнала, полученный при длине входного импульса 2 мс (Рисунок 2.19г), можно отметить явление схожее со сменой фазой, которое в то же время нельзя однозначно интерпретировать.

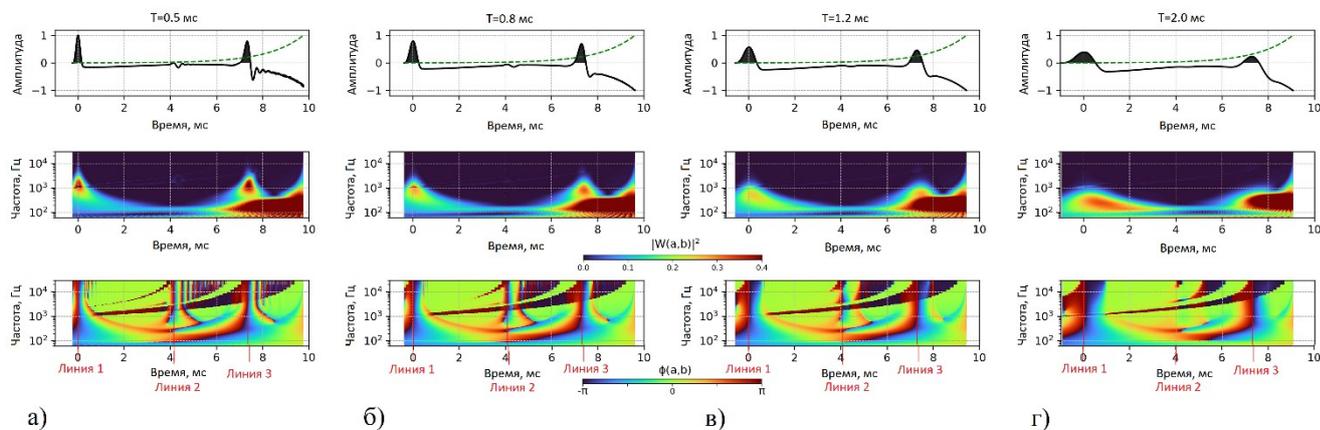


Рисунок 2.19 – Временное представление сигнала, фазовые спектры и точки концентрации энергии для песчаной прослойки толщиной 1 мм при длительности входного импульса: а) 0.5 мс; б) 0.8 мс; в) 1.2 мс; г) 2 мс

Основная проблема данного вида контактных условий секций сваи - воздушной прослойки толщиной 1 мм - заключалась в невозможности определения общей длины сваи, а также в очевидном кратном отражении от стыка сваи. Применение методики комплексного вейвлет-преобразования показывает, что точки концентрации энергии расположены в моменты 4.2 и 8.4 мс, что соответствует отражению волны от стыка на 8 м и кратному отражению на 16 м

(Рисунок 2.20а-г). Анализируя фазовый спектр сигнала, можно отметить, что смена фазы отчетливо наблюдается в моменты 4.2 и 8.4 мс. Также изменение фазы происходит в момент 7.5 мс на сигналах с длиной входного импульса 0.5, 0.8 и 1.2 мс, что соответствует общей длине сваи 14 м.

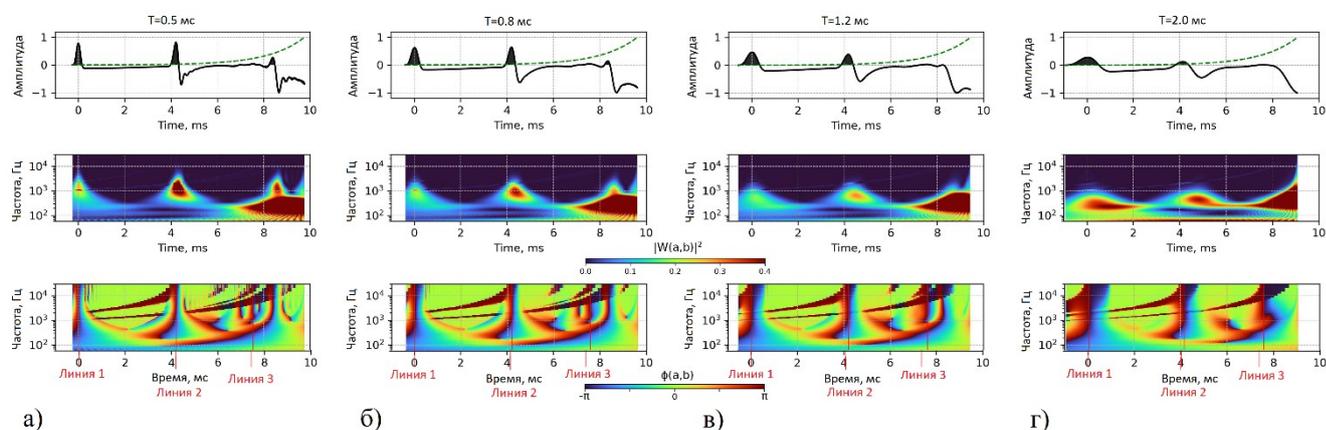


Рисунок 2.20 – Временное представление сигнала, фазовые спектры и точки концентрации энергии для воздушной прослойки толщиной 1 мм при длительности входного импульса: а) 0.5 мс; б) 0.8 мс; в) 1.2 мс; г) 2 мс

Основным преимуществом использования комплексной материнской функции для вейвлет-анализа является возможность изучения фазовых спектров, в которых становятся различимыми даже очень малоамплитудные отраженные сигналы. Хотя зарегистрированные данные могут иметь несколько фазовых изменений, связанных с откликами или же шумом, совместный анализ сигналов, собранных с помощью набора различных молотков, может помочь в локализации необходимых фазовых изменений. Анализ фазовых распределений комплексного вейвлет-преобразования для серии сигналов различных входных импульсов силы позволил локализовать искусственные дефекты и стыки моделей, а также оценить длину всех модельных свай.

### 2.5.3 Отделение полезного сигнала от высокочастотной составляющей

Одна из проблем, которая возникает при интерпретации полученных данных при обследовании свай сейсмоакустическим методом, заключается в наличии высокочастотной составляющей, которая может привести к некорректной расшифровке сигнала. Чтобы отделить полезный сигнал от шума, также применяется методика вейвлет-преобразования.

Для описания процедуры фильтрации сейсмоакустических данных с использованием вейвлет-преобразования добавим к сигналу высокоамплитудный синтетический шум. Синтетический шум задан с использованием двух различных функций – гармонического сигнала  $h(t)$  с центральной частотой 3500 Гц (Рисунок 2.21б) и набора нормально распределенных случайных величин  $n(t)$  (гауссовский шум, Рисунок 2.21в). Функции шума были экспоненциально усилены. Амплитуда шума значительно превышает амплитуду полезного сигнала. Традиционный анализ (во временной области) сигнала, полученного после добавления шумов, не позволяет выделить его особенности, отвечающие регистрации отраженных от нижнего конца сваи волн.

Результаты вейвлет-преобразования исходного сигнала, двух функций шума и суммы всех трёх сигналов, полученные с использованием материнского вейвлета  $\text{mog0.3-1.2}$ , представлены на Рисунке 2.21, справа. На вейвлет-преобразовании исходного сигнала оба интересующих нас импульса выделяются в виде ярких аномалий, локализованных в близком диапазоне частот и наиболее интенсивных в окрестности 1000–1500 Гц. При этом следует отметить, что импульс, соответствующий волнам, отраженным от подошвы сваи, локализуется на более низких частотах. Энергия вейвлет-коэффициентов гармонической функции  $h(t)$  сосредоточена в окрестности 3500 Гц и возрастает с увеличением значений времени. Для гауссовского шума  $n(t)$  аномальные значения вейвлет-коэффициентов проявляются во всем частотном диапазоне и наиболее интенсивны в области низких частот – менее 1000 Гц. Цветовые шкалы вейвлет-преобразования подобраны таким образом, чтобы обеспечить визуализацию как более, так и менее интенсивных аномалий.

Вейвлет-анализ результирующего сигнала (суммы полезного сигнала и шумов) позволяет выделить его компоненты, проявляющиеся в различных частотных диапазонах. Для выполнения фильтрации ограничим ось частот вейвлет-преобразования диапазоном 950–1550 Гц, в пределах которого наиболее ярко выражен импульс, отвечающий возбуждению упругих волн в свае. Далее выполним усреднение значений энергии вейвлет-коэффициентов в данном

частотном диапазоне, рассчитав медиану в скользящем окне. Результат фильтрации показан в условном масштабе красной сплошной линией на Рисунке 2.21г (слева). На отметке времени 5.7 мс уверенно выделяется локальный максимум сигнала, соответствующий моменту регистрации волн, отраженных от нижнего конца сваи.

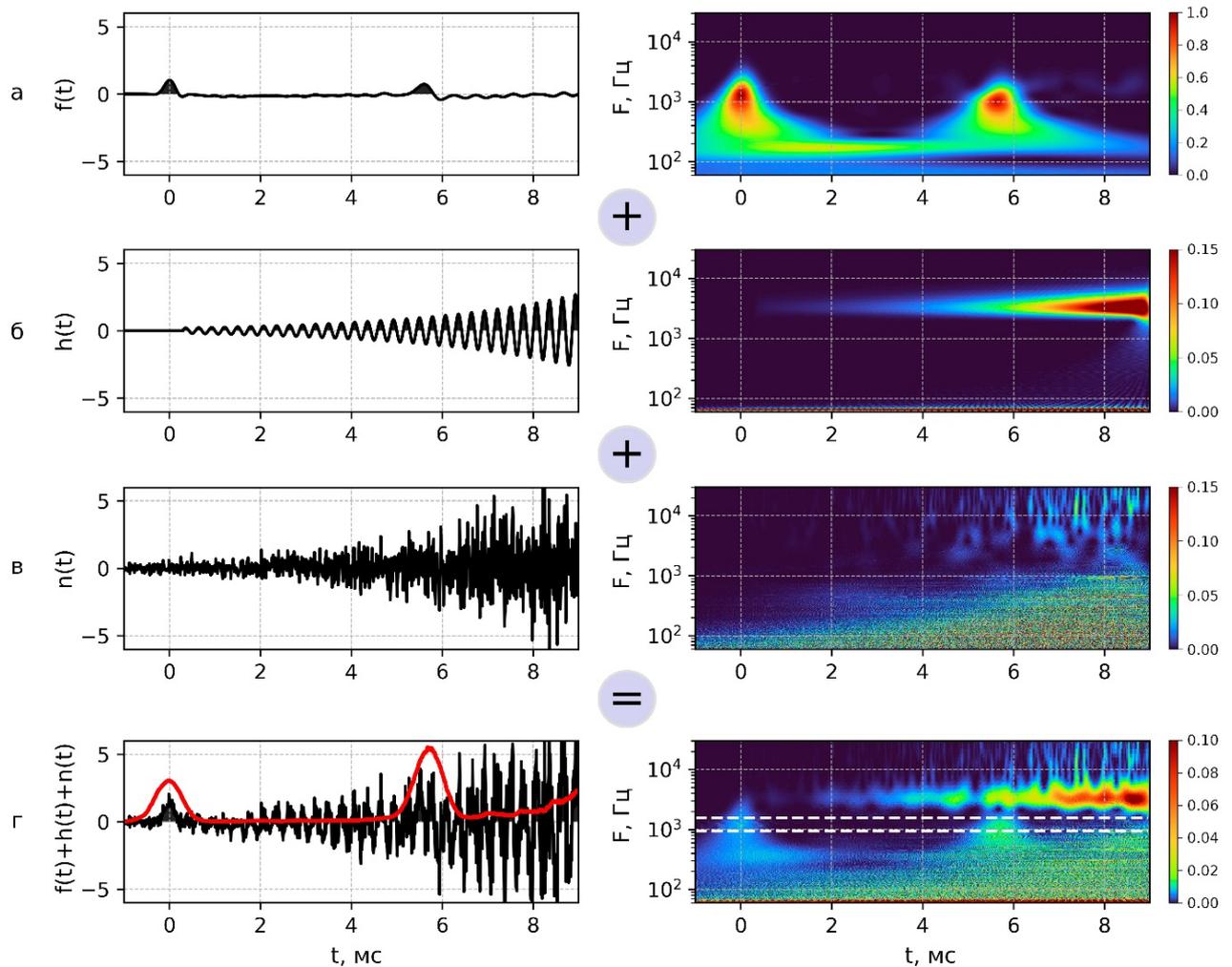


Рисунок 2.21 – Результаты вейвлет-анализа сейсмоакустического сигнала с добавленными шумами (материнский вейвлет –  $\text{mor0.3-1.2}$ ). На панелях слева – временное представление сигналов, справа – результат их вейвлет-преобразования: *a* – исходный сигнал, *б* – гармонический шум, *в* – гауссовский шум, *г* – исходный сигнал с добавленными гармоническим и гауссовским шумами. На панели (*г*), справа белыми пунктирными линиями показаны границы частотного диапазона, в пределах которого выполняется усреднение значений энергии вейвлет-преобразования. Результат усреднения представлен на панели (*г*), слева красной сплошной линией [100].

## 2.6 Выводы по Главе 2

1. Основным преимуществом использования комплексной материнской функции для вейвлет-анализа является возможность изучения фазовых спектров,

в которых становятся различимыми даже очень малоамплитудные отраженные волны.

2. Совместный анализ зарегистрированных сигналов, имеющих несколько фазовых сдвигов, связанных с откликами сигнала или шумом, собранных с помощью набора различных ударных источников, может потенциально обеспечить локализацию необходимых фазовых изменений.

3. Анализ фазовых распределений комплексного вейвлет-преобразования для серии сигналов с различной длительностью входного импульса позволяет локализовать дефекты для моделей свай, устраиваемых в грунте и свай заводского изготовления, а также оценить длину всех смоделированных свай.

4. Показано, что предлагаемая методика, основанная на анализе сигнала в частотно-временном представлении, позволяет выделить полезные составляющие сейсмоакустических сигналов, осложненных интенсивными помехами.

## **ГЛАВА 3 ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОЦЕССОВ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ**

### **3.1 Общие требования и особенности подтверждения соответствия (верификации) методик контроля свай в слабых водонасыщенных грунтах**

Применительно к рассматриваемым в работе методу и технологическим операциям его выполнения в рамках методики контроля можно выделить следующие особенности:

- методика контроля должна описывать последовательность действий при получении сигналов, потенциально несущих информацию о длине сваи и наличии/отсутствии недопустимых неоднородностей в теле сваи, возникших в процессе ее изготовления в грунте или возникших в процессе эксплуатации для свай заводского изготовления при их повторных обследованиях с обеспечением требуемой достоверности при интерпретации результатов (принятии решения);

- методика контроля должна иметь встроенный программный блок обработки сигналов, позволяющий выделить параметры сигналов, функционально связанные с исследуемыми характеристиками свай (длина и координаты неоднородностей) – первичные информативные параметры. Данный блок обладает признаками, подпадающими под понятие методики измерений (в рассматриваемом случае косвенных измерений);

- обе методики (методика контроля и встроенная методика измерений) предполагают проведение их испытаний (верификации и валидации) для подтверждения их адекватности и достоверности определения длины свай и выявления дефектов, возникших на этапе формирования сваи и при ее эксплуатации.

Согласно Федеральному закону от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» к методике или методу измерения можно отнести выполнение совокупности конкретно описанных операций для обеспечения получения результатов измерений с установленными показателями точности. Для того чтобы аттестовать (утвердить) методику контроля,

необходимо провести исследование (верификацию) и подтвердить ее соответствие установленным требованиям [49].

В соответствии с Первой редакцией проекта ГОСТ\_Р «Контроль неразрушающий. Общие требования к разработке и аттестации методик неразрушающего контроля» аттестации подлежат вновь разрабатываемые или пересматриваемые методики [16]. Проведение аттестации методики должно включать в экспертизу проекта методики экспериментальные исследования с использованием специально разрабатываемых испытательных образцов, а также анализ результатов экспериментальных исследований с определением показателей назначения (в том числе, достоверности).

Разрабатываемая методика должна включать в себя следующие разделы:

- «Область применения методики»;
- «Описание метода (методов) неразрушающего контроля»;
- «Требования к средствам контроля»;
- «Меры безопасности»;
- «Требования к квалификации персонала»;
- «Требования к условиям контроля»;
- «Требования к метрологическому обеспечению»;
- «Подготовка к выполнению контроля»;
- «Порядок проведения контроля»;
- «Обработка и оформление результатов контроля».

Исходя из выше изложенного раздел обработка и оформление результатов контроля содержит программный модуль – методику косвенных измерений, которая должна быть также исследована и аттестована с использованием испытательных образцов аттестованных в установленном порядке в соответствии с прилагаемым к ним комплектам документации.

Экспериментальные исследования для аттестации методик выполняются с применением испытательных образцов, которые содержат реальные или

искусственные дефекты, а также испытательных образцов без дефектов, аттестованных в установленном порядке.

На этапе подготовки методики к аттестации испытательные образцы должны быть исследованы, аттестованы и паспортизированы. В паспорте на такие испытательные образцы должно содержаться следующее:

- чертеж испытательного образца и его описание;
- координаты расположения и характеристики искусственных дефектов,

подлежащих выявлению.

### **3.2 Разработка испытательных образцов и испытательного полигона для верификации методики**

В качестве испытательных образцов для аттестации методики сейсмоакустического метода предлагается использовать железобетонные сваи, устраиваемые в грунте, с предварительно заложенными в арматурные каркасы искусственными дефектами из материалов, имитирующих структуру естественных (реальных) дефектов, имеющих характеристические размеры, соответствующие размерам реальных дефектов, а их положение должно соответствовать предполагаемым местам образования в конструкции.

Согласно пункту Б.5 Приложения Б «Требования к испытательным образцам» Первой редакции проекта ИС ГОСТ Р «Контроль неразрушающий. Общие требования к разработке и аттестации методик неразрушающего контроля» количество испытательных образцов, содержащих дефекты, и бездефектных испытательных образцов, необходимых для определения реализуемых значений показателей назначения методики, определяется применительно к каждому показателю назначения с учетом заданных в методике значений и возможной точности оценки показателя.

В соответствие с вышеуказанным была разработана программа для проведения экспериментальных исследований основных технологических процедур контроля свайных фундаментов и комплект испытательных образцов, имитирующих сваи с дефектами, со следующими параметрами:

- испытательный образец с искусственным дефектом, имитирующим естественный дефект «размытие бетонной смеси» размерами  $\text{Ø}250 \times 100$ , в количестве трех штук;
- испытательный образец с искусственным дефектом, имитирующим естественный дефект «грунтовое включение» размерами  $100 \times 150 \times 150$ , в количестве трех штук;
- испытательный образец с искусственным дефектом, имитирующим естественный дефект «грунтовое включение»  $100 \times 150 \times 300$ , в количестве трех штук;
- испытательный образец без дефектов.

Для полной имитации процесса контроля испытательный образец в виде железобетонной сваи изготавливался в грунте в соответствии со стандартной технологией: 1) бурение скважины; 2) ее заполнение бетонной смесью; 3) установка арматурного каркаса с закрепленными искусственными дефектами.

Первый этап проведения экспериментальных исследований заключался в формировании требований, разработке документации, составлении требований и изготовлении искусственных дефектов.

Искусственные дефекты изготавливались из полистирола (Рисунок 3.1), акустические свойства которого (акустический импеданс), на порядок отличались от акустических свойств бетона (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 - Свойства материалов, применяемых для изготовления испытательных образцов

Параметр	Бетон	Полистирол
Плотность, $\text{кг/м}^3$	2400	1060
Скорость продольной волны, м/с	4000	2350
Скорость поперечной волны, м/с	2450	1120
Характеристический акустический импеданс для продольной волны, $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$	9600000	2491000

## Искусственные дефекты

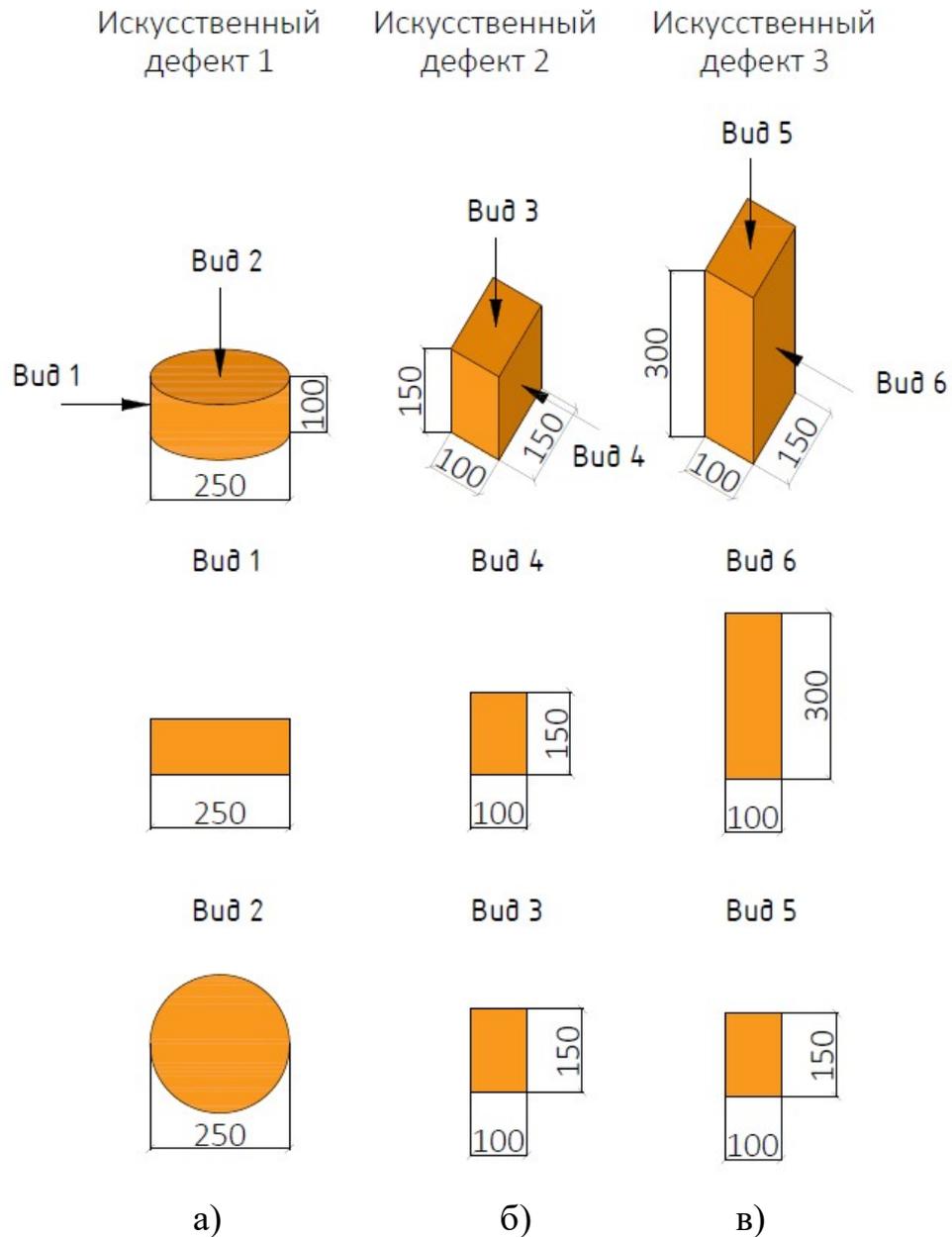


Рисунок 3.1 – Искусственные дефекты: а) искусственный дефект 1, имитирующий естественный дефект «размытие бетонной смеси» размерами 100×250; б) искусственный дефект 2, имитирующий естественный дефект «грунтовое включение» размерами 100×150×150; в) искусственный дефект 3, имитирующий естественный дефект «грунтовое включение» размерами 100×150×300

Материалом при изготовлении искусственных дефектов, имитирующих естественные дефекты «размытие бетонной смеси» выступал полистирол (Рисунок 3.2). Сам искусственный дефект изготавливался в виде цилиндра диаметром, равным внутреннему диаметру арматурного каркаса. В

рассматриваемом случае размеры цилиндров составляли: диаметр 250 мм и толщина 100 мм.

Искусственные дефекты для имитации естественного дефекта «грунтовое включение» также формировались из полистирола в форме прямоугольного параллелепипеда двух размеров:  $100 \times 150 \times 150$  мм и  $100 \times 150 \times 300$  мм.



а)

б)

Рисунок 3.2 – Искусственные дефекты: а) искусственный дефект 1, имитирующий естественный дефект «размытие бетонной смеси» размерами  $100 \times 250$ ; б) искусственный дефект 2, имитирующий естественный дефект «грунтовое включение» размерами  $100 \times 150 \times 150$ ; в) искусственный дефект 3, имитирующий естественный дефект «грунтовое включение» размерами  $100 \times 150 \times 300$

На втором этапе осуществлялась подготовка арматурных каркасов (Рисунок 3.3).

Обычно арматурные каркасы изготавливаются в заводских условиях, но также могут изготавливаться и на строительной площадке.

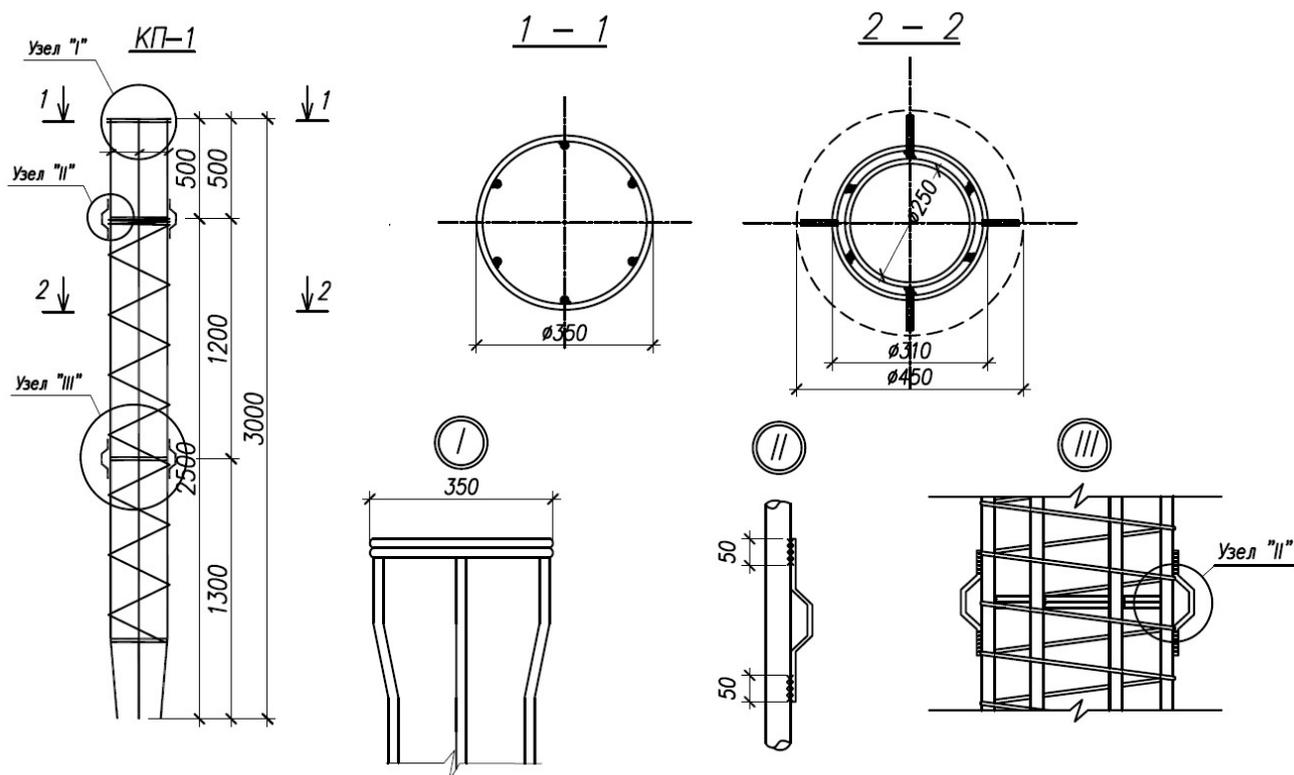


Рисунок 3.3 – Схема изготовления арматурного каркаса

Арматурный каркас собирался из продольной арматуры, которая приваривалась к кольцам жесткости. Поверх продольной арматуры по спирали приваривалась гладкая (навивочная) арматура для обеспечения совместной работы стержней. Продольные стержни изготавливались из рифлёной арматуры класса АII, АIII. Навивка изготавливалась из арматуры класса АI (А240). Кольца жесткости изготавливались из листового горячекатанного проката толщиной 5 мм.

В зависимости от диаметра сваи нормативная документация определяет количество продольных стержней для изготовления арматурного каркаса. Для свай диаметром 400-500 мм используется шесть продольных арматурных стержней.

Хранение каркасов на стройплощадке должно исключать возможность их повреждения. Под каркасы были установлены деревянные подкладки на расстоянии 300 мм от поверхности земли. От воздействия атмосферных осадков каркасы укрывались непромокаемым материалом.

Для подготовки испытательных образцов (свай) были изготовлены каркасы длиной 3 метра, состоящие из шести продольных стержней арматуры  $\varnothing 18$  мм. Внутренний диаметр каркаса составил 250 мм (Рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Готовые арматурные каркасы

Третий этап заключался в процессе закрепления искусственных дефектов к арматурным каркасам в заданных местах в соответствии с конструкторской документацией.

Искусственные дефекты закреплялись с внутренней стороны арматурного каркаса ровно по центру при помощи вязальной проволоки (Рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Арматурные каркасы с искусственными дефектами

Четвертый и последующие этапы заключались непосредственно в изготовлении самих испытательных образцов (свай), которые включают в себя бурение, бетонирование и армирование скважины.

Скважины могут изготавливаться по различным технологиям, например, с использованием полого проходного шнека (СФА) с извлечением грунта, обсадной трубы или при помощи уплотнения стенок скважины (DDS).

В данном случае скважины для испытательных образцов изготавливались по технологии СФА. Более подробно данная технология рассматривается в Главе 1.

Бурение скважины осуществлялось при помощи буровых установок, оснащенных специальным буровым снарядом - полым шнеком. Перед началом бурения для буровой установки было подготовлено твердое устойчивое основание из кирпичного боя. Буровая установка устанавливалась на точку предполагаемого устройства испытательного образца (свай). Бурение производилось с заданной отметки до достижения бурового инструмента заданной глубины. В данном случае глубина заложения пяты испытательного образца (свай) составила 3 метра от поверхности площадки (Рисунок 3.6).

На пятом этапе изготовления испытательных образцов (свай) осуществлялось бетонирование скважины.



Рисунок 3.6 – Процесс бетонирования испытательного образца (свай)

Бетонная смесь изготавливалась на бетонном заводе в соответствии с ГОСТ 7473 и поставлялась на строительную площадку автобетоносмесителями [13].

Испытательные образцы (сваи) должны изготавливаться из тяжелых бетонов классом не ниже В15, обладающих достаточной прочностью на сжатие. Так как испытательные образцы (сваи) изготавливаются в водонасыщенных грунтах, марка по водонепроницаемости бетона должна быть не менее W6. По удобоукладываемости бетонная смесь должна соответствовать марке П4-П5. Контроль данного параметра должен осуществлялся на строительной площадке перед началом бетонирования скважины путем определения осадки стандартного конуса [10]. Ввиду того, что изготовление испытательных образцов проводилось в зимнее время, в бетонную смесь добавлялись противоморозные добавки. Для контроля прочности бетонной смеси также изготавливались контрольные образцы, которые прошли испытание на сжатие через 28 дней после бетонирования.

В условиях изготовления испытательных образцов бетонная смесь поставлялась с характеристиками В25W4П5F150.

Бетонирование скважины испытательного образца (сваи) бетонной смесью производилось от забоя скважины через внутреннюю полость бурового снаряда с его одновременным поднятием при помощи автобетононасосов. Бетонирование велось до подъема бурового снаряда из устья скважины на дневную поверхность.

Заключительным этапом изготовления испытательных образцов (свай) являлся процесс армирования скважины при помощи арматурных каркасов с искусственными дефектами (Рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Армирование скважины арматурными каркасами с искусственными дефектами

Перед армированием скважины арматурный каркас был проверен на соответствие его элементов проектным значениям и документации, таких как: длина стержней, соответствие размеров поперечного сечения металлопроката, диаметр каркаса и другим, в соответствии с требованиями разработанной конструкторской документации.

Спуск арматурных каркасов выполнялся при помощи вспомогательной лебедки буровой установки с применением вибропогружателя. Способы строповки, подъёма и перемещения каркаса в скважину исключали появления в нём деформаций. Арматурный каркас устанавливался на забой скважины.

Параметры испытательных образцов, изготовленных на полигоне, представлены на Рисунке 3.8.

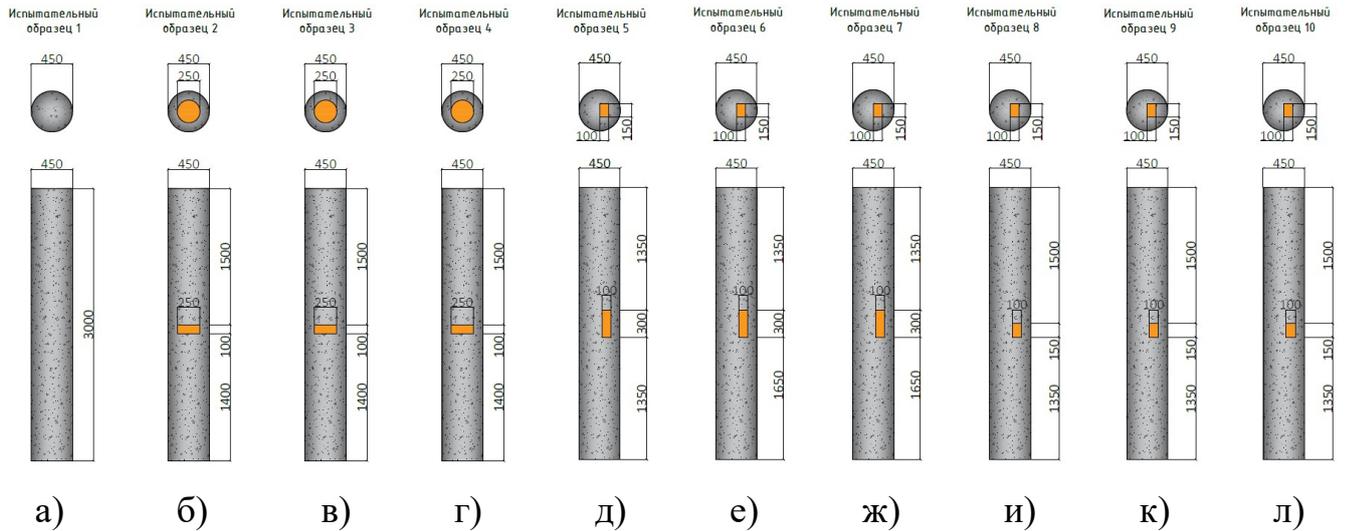


Рисунок 3.8 – Изготовленные испытательные образцы (сваи) с искусственными дефектами: а) бездефектный испытательный образец 1; б-г) испытательные образцы 2-4 с искусственным дефектом, имитирующим естественный дефект «размытие бетонной смеси» размерами 100×250; д-ж) испытательные образцы 5-7 с искусственным дефектом, имитирующий естественный дефект «включение грунта» размерами 100×150×300; и-л) испытательные образцы 8-10 с искусственным дефектом, имитирующим естественный дефект «включение грунта» размерами 100×150×150

Состав и количество испытательных образцов позволяет утверждать, что с его использованием можно проводить аттестацию методик контроля (измерения) и оценивать характеристики оборудования, которое будет прописано в методиках контроля свайных фундаментов.

### **3.3 Разработка программы экспериментальных исследований и проведение полевых испытаний на испытательном полигоне для верификации методики измерений**

Основные положения программы экспериментальных исследований должны соответствовать требованиям методики испытаний, которую следует разрабатывать в соответствии с ASTM D5882 и с предварительным международным стандартом Российской Федерации «Сваи. Сейсмоакустический метод контроля длины и сплошности», а также стандартами различных организаций, осуществляющих контроль свай [40, 43, 60].

### **3.3.1 Область применения методики**

Как было указано выше, сейсмоакустический метод относится к неразрушающим методам контроля и основывается на возбуждении в оголовке сваи упругих колебаний.

Данный метод позволяет при (разработке соответствующих методик косвенных измерений):

- оценить длину и сплошность свай;
- выявить отклонения размеров поперечного сечения сваи с величиной более 25% от площади сечения;
- оценить месторасположение дефектов, рассмотренных выше, и поперечных трещин;
- оценить месторасположение стыка в сваях заводского изготовления.

Метод имеет ограничения по применению и не позволяет контролировать и оценивать:

- плавное изменение поперечного сечения сваи;
- отклонение сваи от вертикальной оси;
- тип дефекта;
- размеры дефекта;
- прочность и несущую способность сваи.

### **3.3.2 Особенности сейсмоакустического метода, требующие учета при разработке методики контроля**

Сейсмоакустический метод основан на возбуждении упругих волн в теле сваи при помощи ударных источников. Упругие волны возбуждаются в оголовке сваи, распространяются вдоль тела сваи, отражаясь от мест изменения акустического импеданса (различного рода несплошностей, а также пяты сваи) и возвращаются к поверхности оголовка сваи в виде сложного сигнала, требующего расшифровки и частотно-фазового анализа.

В качестве ударных источников выступают различные виды ручных молотков, возбуждающих многочастотные сигналы. Удар должен наноситься по направлению вдоль оси сваи.

Набор ударных источников должен включать в себя молотки от легких металлических до тяжелых киянок. Это необходимо для возбуждения импульсов различной длительности.

Регистрация упругих волн осуществляется при помощи акустического датчика-преобразователя, который устанавливается на оголовки сваи.

Длина сваи, а также место до расположения неоднородностей (дефектов), определяются по формуле (3.1):

$$L = \frac{Vt}{2}, \quad (3.1)$$

где  $V$  - скорость упругой волны в теле сваи, задаваемая в диапазоне от 3600 м/с до 4200 м/с в зависимости от возраста сваи и марки бетона;

$t$  - время распространения упругой волны от оголовка сваи до дефекта и обратно, с.

### **3.3.3 Требования к средствам контроля**

#### **3.3.3.1 Требования, предъявляемые к аппаратуре для возбуждения и приема упругих волн и обработки сигналов**

Комплект оборудования, предназначенный для проведения испытания и обработки сигналов, должен включать электронное устройство (компьютер) со специальным программным обеспечением, визуализирующим зарегистрированные сигналы, датчик-преобразователь и набор ударных источников (различных молотков), необходимых для ударного воздействия.

Требования, предъявляемые к приборам [43]:

- Диапазон измерения времени (не менее): 500-40000 мкс;
- Рабочая полоса частот: 10-5000 Гц;
- Частота дискретизации (не менее): 32 кГц;
- Предел допускаемой относительной погрешности (не более):  $\pm 5\%$ ;
- Время непрерывной работы от аккумулятора (не менее): 5 ч.

Регистрация упругих волн происходит при помощи акустического датчика-преобразователя, по результатам измерений которого строится зависимость ускорения колебаний или скорости колебаний от времени. Датчик может быть как проводными, так и беспроводными.

Датчик-преобразователь должен иметь диапазон измерений не менее  $\pm 490 \text{ м/с}^2$  и полосу рабочих частот не менее 5000 Гц.

Далее сигналы должны быть непосредственно оцифрованы с использованием аналого-цифрового преобразователя с разрешением не менее 12 бит (предпочтительно с разрешением 16 бит или выше) с полосой рабочих частот не менее 5000 Гц (Рисунок 3.9). Частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя должна быть не менее 25000 Гц и переданы в устройство постоянного хранения данных [60]. Для каждого записанного сигнала необходимо присвоить номер или название, а также указать дату проведения испытания.

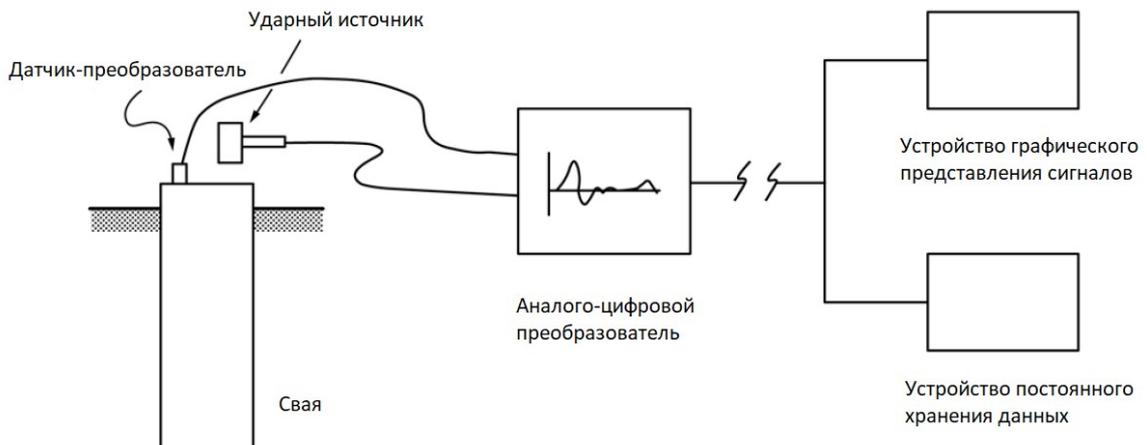


Рисунок 3.9 – Схема записи и передачи сигнала [43]

### 3.3.3.2 Требования, предъявляемые к ударным источникам

В комплекте оборудования должно быть несколько ударных источников. В качестве ударных источников выступают молотки различного вида и веса с разными материалами насадок (Рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Рекомендуемый набор ударных источников

Использование набора ударных источников необходимо для возбуждения волн в теле сваи с различным частотным диапазоном. При использовании легких металлических молотков происходит возбуждение более коротких импульсов, что повышает чувствительность метода, однако зачастую в сигнале появляется шумовая структурная составляющая, которая затрудняет интерпретацию полезного сигнала. При использовании более тяжелых молотков-киянок или молотков с пластиковой насадкой, происходит возбуждение более длинных импульсов. Использование такого типа ударного источника позволяет надежнее выделить отражение от пяты сваи.

Обследование свай с использованием мультисигментного возбуждения сигнала необходимо для комплексной оценки длины и сплошности свай. В зависимости от решаемой задачи производится подбор ударного источника, но не менее двух.

### 3.3.4 Меры безопасности

Работы следует выполнять согласно действующим нормам, отвечающим за безопасность труда в строительстве и на строительном производстве.

Также согласно СП.49.13330:

Все находящиеся на строительной площадке сотрудники, в том числе инженеры, выполняющие работы по обследованию свай, должны быть в

защитной одежде, каске, а также использовать индивидуальные средства защиты, включающие перчатки, очки и специальную обувь.

К зонам постоянно действующих опасных производственных факторов относятся:

- места вблизи от незаземленных токоведущих частей электроустановок;
- места вблизи от не огражденных перепадов по высоте 1,3 м и более;
- места, где возможно превышение предельно допустимых концентраций вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

К зонам потенциально опасных производственных факторов следует относить:

- участки территории вблизи строящегося здания (сооружения);
- этажи (ярусы) зданий и сооружений в одной захватке, над которыми происходит монтаж (демонтаж) конструкций или оборудования;
- зоны перемещения машин, оборудования или их частей, рабочих органов;
- места, над которыми происходит перемещение грузов кранами.

Места прохода людей в пределах опасных зон должны иметь защитные ограждения.

В местах перехода через траншеи, ямы, канавы должны быть установлены переходные мостики, огражденные с обеих сторон перилами высотой не менее 1,1 м.

Колодцы, шурфы и другие выемки должны быть закрыты крышками, щитами или ограждены. В темное время суток указанные ограждения должны быть освещены электрическими сигнальными лампочками.

Рабочие места и проходы к ним, расположенные на перекрытиях, покрытиях на высоте более 1,3 м и на расстоянии менее 2 м от границы перепада по высоте, должны быть ограждены защитными или страховочными ограждениями.

При выполнении работ на высоте, внизу, под местом работ необходимо выделить опасные зоны, которые должны быть оборудованы соответствующими защитными устройствами (настилами, сетками, козырьками).

Токоведущие части электроустановок должны быть изолированы, ограждены или размещены в местах, недоступных для случайного прикосновения к ним.

Зоны с уровнем звука свыше 85 дБ должны быть обозначены знаками безопасности. Работа в этих зонах без использования средств индивидуальной защиты запрещается.

### **3.3.5 Требование к квалификации персонала**

Контроль в полевых условиях должен осуществляться специалистами, имеющими инженерно-техническое образование по строительному или геофизическому направлению и прошедшими обучение основам сейсмоакустического контроля свай, имеющих уровень по акустическому контролю не менее второго.

### **3.3.6 Требования к условиям и выполнению контроля**

Перед началом проведения испытаний необходимо проанализировать имеющуюся документацию, содержащую информацию о проекте и конструкции свай, а именно:

- инженерно-геологические изыскания;
- проектная документация (план свайного поля, конструктивные чертежи свай);
- акты освидетельствования скрытых работ;
- журналы производства работ (по забивке свай (в случай свай заводского изготовления), по бурению скважин, по бетонированию и армированию).
- документы на используемые материалы (документ о качестве бетонной смеси).

На основе данных об инженерно-геологических изысканиях необходимо проанализировать инженерно-геологический разрез и определить тип грунта, служащий основанием пяты сваи, выявить отметки слоев грунта с резким изменением акустической жесткости, а также определить наличие специфических грунтов, уровень грунтовых и напорных (при наличии) вод.

При проведении обследования сваи во влажных условиях или в условиях низких отрицательных температур должны быть предусмотрены защитные конструкции в месте проведения испытаний в соответствии с параметрами влагозащитности приборов и в допустимом диапазоне температур согласно паспортным данным.

Проведение испытаний не допускается вблизи зон динамического воздействия. В случае невозможности устранения источника динамического воздействия произвести испытание в другое время.

На момент проведения испытания должно пройти не менее 5-7 дней после бетонирования скважины испытательного образца (сваи). Должен быть получен доступ к оголовку испытательного образца (сваи).

Перед проведением испытания необходимо провести визуальный осмотр оголовка испытательного образца (сваи), произвести его замеры и оценить состояние его поверхности. Также необходимо очистить поверхность от посторонних материалов, трещин и расслоений.

Не допускается производить испытание при разрушенном оголовке испытательного образца (сваи) или наличии в нем шламового слоя. В этом случае необходимо срубить оголовок до бетона с ненарушенной сплошностью.

Площадки для установки датчика-преобразователя и нанесения ударов должны быть очищены от пыли и грязи, а также гладко зашлифованы и выровнены при помощи шлифовальной машины перпендикулярно оси испытательного образца.

Крепление датчика-преобразователя к поверхности оголовка испытательного образца (сваи) осуществляется при помощи адгезива, в качестве которого может использоваться специальная мастика, литол или другие виды.

Необходимо обеспечить надежный акустический контакт между датчиком-преобразователем и поверхностью оголовка испытательного образца (сваи). Также при помощи адгезива могут быть компенсированы небольшие неровности (не более 5 мм) на поверхности оголовка.

Датчик-преобразователь рекомендуется устанавливать на расстоянии половины радиуса сваи.

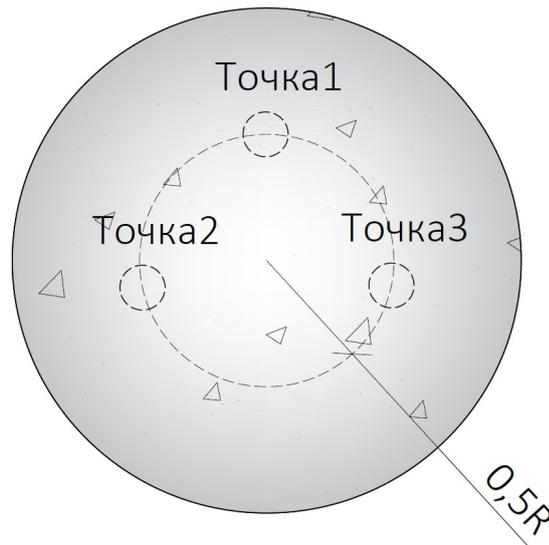


Рисунок 3.11 – Схема точек установления датчика-преобразователя

### 3.3.7 Требования к метрологическому обеспечению

Все применяемое оборудование должно иметь соответствующие сертификаты испытаний и свидетельства о поверке (калибровке).

### 3.3.8 Порядок проведения контроля

1. Получить доступ к оголовку сваи. В случае нарушения его сплошности, срубить оголовок до бетона с ненарушенной сплошностью.
2. Оголовок сваи очистить от пыли, грязи, мусора и т.д.
3. Выбрать на поверхности оголовка сваи не менее трех точек возбуждения и приема сигнала.
4. Для точек возбуждения и приема сигнала подготовить площадки путем шлифования
5. Перед установкой датчика-преобразователя и нанесением удара площадки очистить от пыли и высушить.

6. Установить датчик на подготовленный участок оголовка сваи при помощи адгезива параллельно оси сваи.

7. Для каждой точки приема необходимо нанести не менее пяти ударных воздействий перпендикулярно плоскости сваи.

### **3.3.9 Обработка и оформление результатов контроля**

В процессе испытаний необходимо вести журнал проведения испытаний, в котором указывается название объекта, геометрические размеры сваи, используемый прибор и ударные источники.

После проведения обследования осуществляется обработка полученных данных, включающая в себя несколько этапов.

При использовании акселерометров в качестве датчика-преобразователя производится процедура интегрирования, которая заключается в переводе значений ускорения смещения частиц оголовка сваи в значение скорости.

Полученные данные по каждой отдельной свае необходимо объединить в один массив для дальнейшей визуализации и совместной работы, которая включает в себя контроль качества и анализ особенностей зарегистрированных сигналов.

При необходимости производится усиление (экспоненциальное) сигнала необходимое для компенсации его ослабления. Параметр усиления подбирается таким образом, чтобы амплитуда входного импульса примерно соответствовала отраженному от пяты сваи импульсу.

В случае присутствия высокочастотной составляющей в полученном сигнале, производится фильтрация, задача которой заключается в отделении полезного сигнала от шумовой составляющей.

Оценка длины сваи и месторасположения дефекта осуществляется по формуле 3.1. Для перевода значений из временного представления в значения глубины задается скорость распространения упругих волн в бетоне, которая предполагается постоянной и принимается по данным градуировочных зависимостей. Рекомендованный диапазон скорости находится в пределах от 3500 м/с до 4400 м/с в зависимости от типа бетона и возраста сваи.

Отчет по обследованию свай сейсмоакустическим методом должен включать следующее:

- название, местоположение, характеристику объекта и его инженерно-геологические условия;
- схему расположения свайного поля с отмеченными номерами испытанных свай;
- диаметр и длину сваи (для свай заводского изготовления-длины секций) согласно проекту, а также технологию ее изготовления;
- абсолютные отметки оголовка сваи на момент проведения испытания;
- информацию об уложенном бетоне (марка и объем);
- дату изготовления сваи и проведения испытаний;
- краткое описание применяемой методики;
- описание применяемого оборудования;
- обработанные сигналы с указанием ударных источников;
- заключение об оценке длины и сплошности обследуемой сваи;
- приложения, включающие в себя свидетельства о допуске лаборатории к работам в области инженерных изысканий.

### 3.4 Обсуждение результатов проведенных экспериментальных исследований

В качестве прибора для испытания испытательных образцов (свай) использовался Спектр-4.0 (Рисунок 3.12) с характеристиками, приведенными в таблице 3.2.



Рисунок 3.12 – Используемое оборудование: прибор Спектр 4.0

Таблица 3.2 – Характеристики используемого оборудования (Спектр 4.0)

Количество каналов регистрации	2
Соотношение сигнал/шум, дБ	92
Диапазон частот, Гц	10...23000
Частоты дискретизации, кГц	46,9
Количество линий в спектре	1000
Память, Гбайт, не менее	4
Время непрерывной работы, ч	10
Расстояние датчик-планшетный компьютер, м, не менее	10
Габаритные размеры, мм	–
- датчика	Ø38x85
- планшетного компьютера	206x125x11
Масса, кг	–
- датчика	0,15
- планшетного компьютера	0,35
- молотка с демпфером / с демпфером и датчиком силы	0,51/1,44

Испытание проводилось через 7 дней после завершения изготовления испытательных образцов (свай).

Перед проведением испытания поверхность оголовка была очищена, были подготовлены площадки для возбуждения упругих волн и регистрации сигнала.

Вмещающим грунтом для испытательных образцов являлся песок.

В процессе изготовления испытательных образцов (свай) велся журнал бурения, бетонирования и армирования.

Для каждого испытательного образца наносилось не менее десяти ударных воздействий в каждой точке установления датчика-преобразователя.

Ударным источником при проведении испытания являлся молоток с резиновой насадкой, входящий в комплект оборудования.

Во время проведения испытания велся журнал работ. Результаты испытаний приведены на Рисунках 3.13 – 3.14.

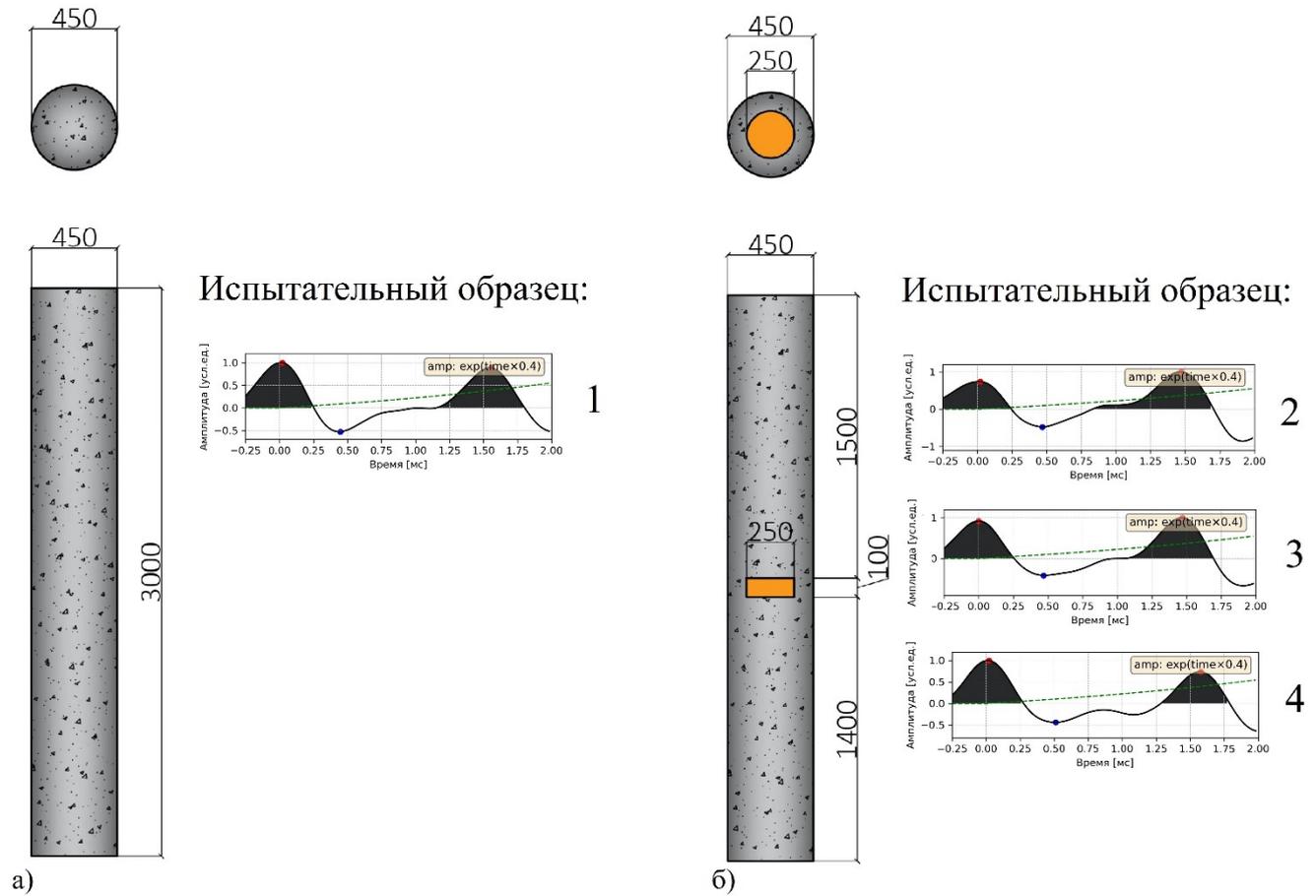


Рисунок 3.13 – Результаты обработки сигналов, полученных при обследовании: а) бездефектного испытательного образца; б) испытательных образцов 2-4 с искусственным дефектом 1, имитирующим естественный дефект «размытие бетонной смеси» размерами 100×250

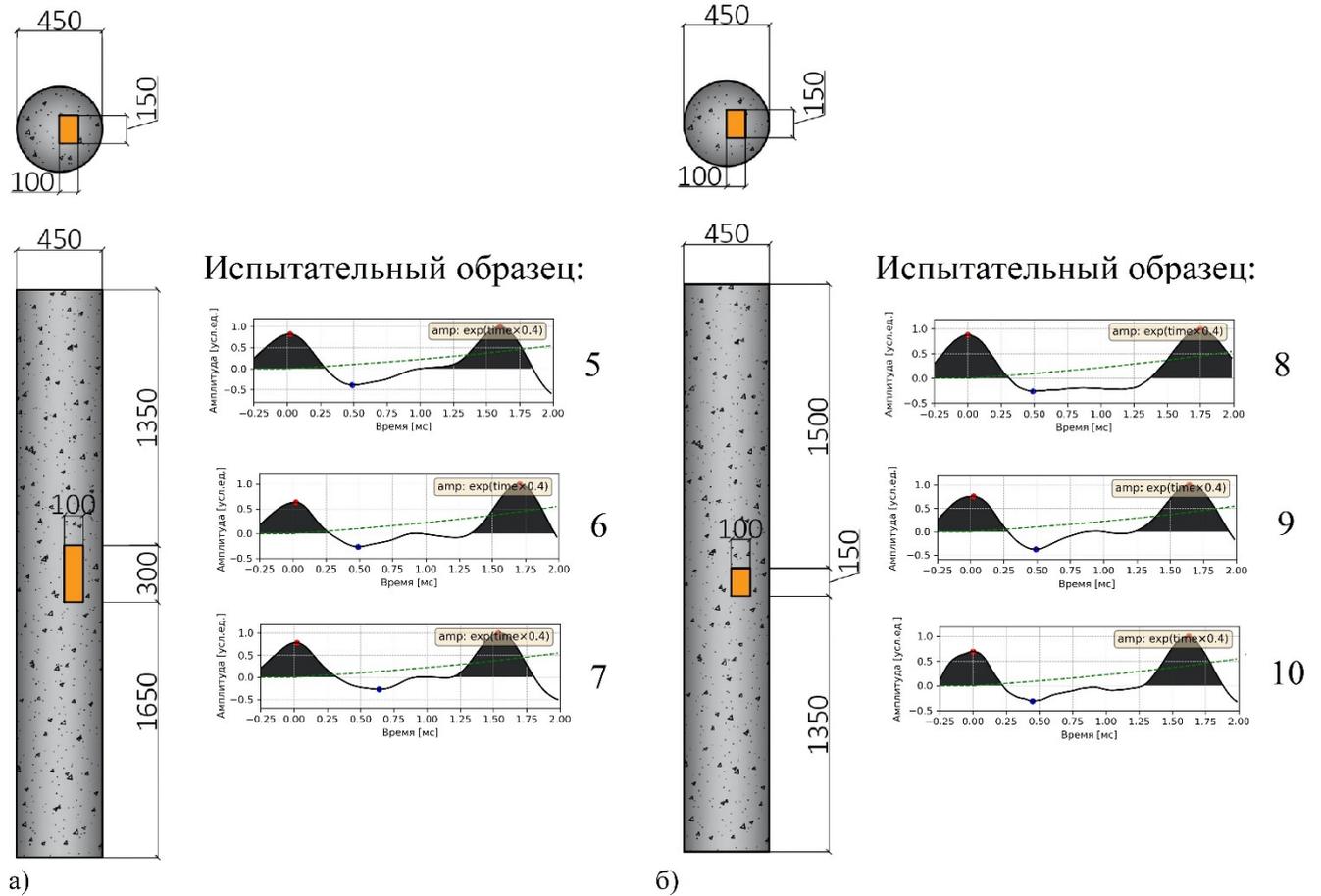


Рисунок 3.14 – Результаты обработки сигналов, полученных при обследовании:

- а) испытательного образца с искусственным дефектом 2, имитирующим естественный дефект «включение грунта» размерами  $100 \times 150 \times 300$ ;
- б) испытательного образца с искусственным дефектом 2, имитирующим естественный дефект «включение грунта» размерами  $100 \times 150 \times 150$

Каждый обработанный сигнал имел характерные признаки, показывающие четкую фиксацию отражения от пяты испытательного образца (свай) на отметке времени около 1,5–1,7 мс, что соответствует 3-метровой свае с принятым значением скорости волны 3550–4000 м/с. Однако изменений сигнала, которые можно объяснить дефектами, установленными в испытательных образцах (сваях), не зарегистрировано. Таким образом, испытания с использованием низкочастотного возбуждения при помощи сейсмоакустического метода показали хорошую сходимость с результатами моделирования, а именно подтвердили длину испытательных образцов (свай), но не смогли идентифицировать дефекты без применения специальных методик.

### 3.5 Выводы по Главе 3

1. На основании сформулированных требований разработан комплект документации на испытательные образцы свай с искусственными дефектами, имитирующими реальные, технология их изготовления, а также комплект испытательных образцов в составе полигона, соответствующий условиям формирования и применения свайных фундаментов.

2. Разработанная методика проведения исследований подтвердила правильность основных ее положений, которые позволяют на ее базе разработать проект методики контроля свайных фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах с использованием сейсмоакустического метода в соответствии с действующими и перспективными отечественными и международными нормативными документами.

3. Проведены исследования методики на испытательных образцах с искусственными дефектами, подтвердившие основные результаты моделирования процессов возбуждения и приема акустических сигналов при сейсмоакустическом контроле, а также необходимость анализа фазы сигнала в частотно-временном представлении для выделения информативных параметров сигналов, функционально связанных с характеристиками и локализацией внутренних дефектов, возникающих в сваях при их формировании.

## **ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ И РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ**

Для повышения достоверности выявления дефектов в сваях, как уже анализировалось выше, предлагается адаптировать методы выделения первичных информативных параметров, функционально связанных с геометрическими параметрами неоднородностей (недопустимых дефектов), которые количественно оценивают результаты в совокупности с глубоким обучением систем. При этом под повышением достоверности сейсмоакустического контроля понимается методически и метрологически обоснованные аппаратные и программные решения, обеспечивающие возможность выявления недопустимых дефектов структуры свайных фундаментов в условиях их возведения и эксплуатации.

Ниже рассмотрены и обоснованы основные положения и программные решения методики измерений и анализа результатов как части проекта методики контроля свайных фундаментов в грунтах, обеспечивающие повышение достоверности выявления дефектов свайных фундаментов, рассмотренных в Главах 1 и 2.

### **4.1 Фазовый анализ сигналов, полученных при обследованиях испытательных образцов (свай), в частотно-временной области с использованием комплексного вейвлет-преобразования и выделение первичных информативных параметров.**

Выполненный в Главе 2 теоретический анализ показал, что комплексное вейвлет преобразование позволяет не только оценить частотный состав сигнала, но и выявить, в какой момент времени появилась та или иная частота (выделить фронт, соответствующий ее приходу). Для применения вейвлет-преобразования необходимо выбрать исходную материнскую функцию. В данном случае в качестве этой функции оптимально использовать комплексный вейвлет Морле. Особенности использования комплексного вейвлета Морле заключаются в возможности варьирования параметров пропускной способности и центральной

частоты. Также одним из главных отличий комплексного вейвлет-преобразования является информация о фазе, что позволяет повысить точность интерпретации сигнала. Анализируя время смены фазы, что свойственно процессам отражения акустических колебаний на границе раздела сред, можно оценить сплошность конструкции и местоположение несплошностей.

Ниже представлен алгоритм обработки сигналов на основе вейвлет-преобразования.

Для обработки полученных сигналов при помощи вейвлет-преобразования необходимо применять специализированное программное обеспечение или код программы с инструментами вейвлет-преобразования, переводящего анализируемый сигнал из временного в частотно-временное представление.

Для применения вейвлет-преобразования осуществлялся выбор материнской функции для дальнейшего анализа сигналов.

В качестве материнской функции необходимо использовать комплексные вейвлеты, позволяющие анализировать время изменения фазы сигнала [83, 90, 91, 92].

По результатам применения преобразования строится плоское изображение (так называемая «вейвлетограмма» в координатах «время-частота»).

На вейвлетограмме обозначаются точки концентрации энергии, которые соответствуют максимальному значению амплитуды (при наличии в свае дефектов или включений амплитуда акустического сигнала меняется)

Далее линиями, например, Линия 1 и Линия 2, отмечаются места сдвига фазы с  $-\pi$  до  $\pi$ .

В случае, если точка концентрация энергии неочевидна, изменение фазы должно определяться как прямая линия, проходящая из зоны высоких частот в зону низких частот.

Для определения местоположения дефекта, длины сваи или стыка секций свай заводского изготовления находится разница по времени между проведенными Линией 1 и Линией 2. Определение искомого параметра осуществляется по формуле 3.1

По результатам моделирования и подтверждающих это экспериментальным исследованиям были сделаны выводы о невозможности выявления искусственных дефектов в испытательных образцах, основываясь только на применении сейсмоакустического метода.

К данным, полученным при обследовании испытательных образцов, было применено комплексное вейвлет-преобразование, аналогичное описанному в Главе 2, что позволило локализовать дефекты, тем самым повысив достоверность интерпретации сигналов, полученных при использовании сейсмоакустического метода.

Ниже приведены результаты применения комплексного вейвлет-преобразования на сигналах, полученных при обследовании испытательных образцов.

Также, как и в разделе, описывающем моделирование процессов, происходящих при использовании сейсмоакустического метода, отметим на полученных данных места сдвига фазы с  $-\pi$  до  $\pi$  линиями. Линия 1 – место изменения фазы, соответствующее входному сигналу, Линия 2 – место изменения фазы, соответствующее отраженному от пяты сваи сигналу, Линия 3 – место изменения фазы, соответствующее отраженному от дефекта сигналу.

На Рисунке 4.1 показаны результаты применения комплексного вейвлет-преобразования к данным (сигналам), соответствующим бездефектному испытательному образцу 1 и испытательным образцам 2-4 с искусственным дефектом размерами  $100 \times 250$ , имитирующим естественный дефект «размытие бетонной смеси», возникающий при изготовлении свай в грунте.

Анализируя Рисунок 4.1а, можно сделать вывод о том, что смена фазы, которая обозначена Линией 1 и Линией 2, соответствующая входному и отраженному от пяты сваи импульсу, четко прослеживаются на всех испытательных образцах на 0 мс и 1.6 мс, что при скорости 3800 м/с соответствует длине сваи 3 метра.

Линией 3 обозначена смена фазы сигнала, соответствующей отраженному от искусственного дефекта импульса.

Смену данной фазы можно наблюдать на Рисунке 4.2а-б, которая прослеживается на отметке 0.8 мс и соответствует месторасположению дефекта на отметке 1.5 метра.

Ввиду того, что в испытательном образце 1 отсутствует искусственный дефект, смена фазы на отметке 0.8 мс не наблюдается.

На Рисунке 4.2 показаны результаты применения комплексного вейвлет-преобразования к данным (сигналам), соответствующим испытательным образцам 5-7 с дефектом, имитирующим естественный дефект «включение грунта» размерами  $100 \times 150 \times 150$  и испытательным образцам 8-10 «включение грунта» размерами  $100 \times 150 \times 300$ , возникающих при изготовлении свай в грунте.

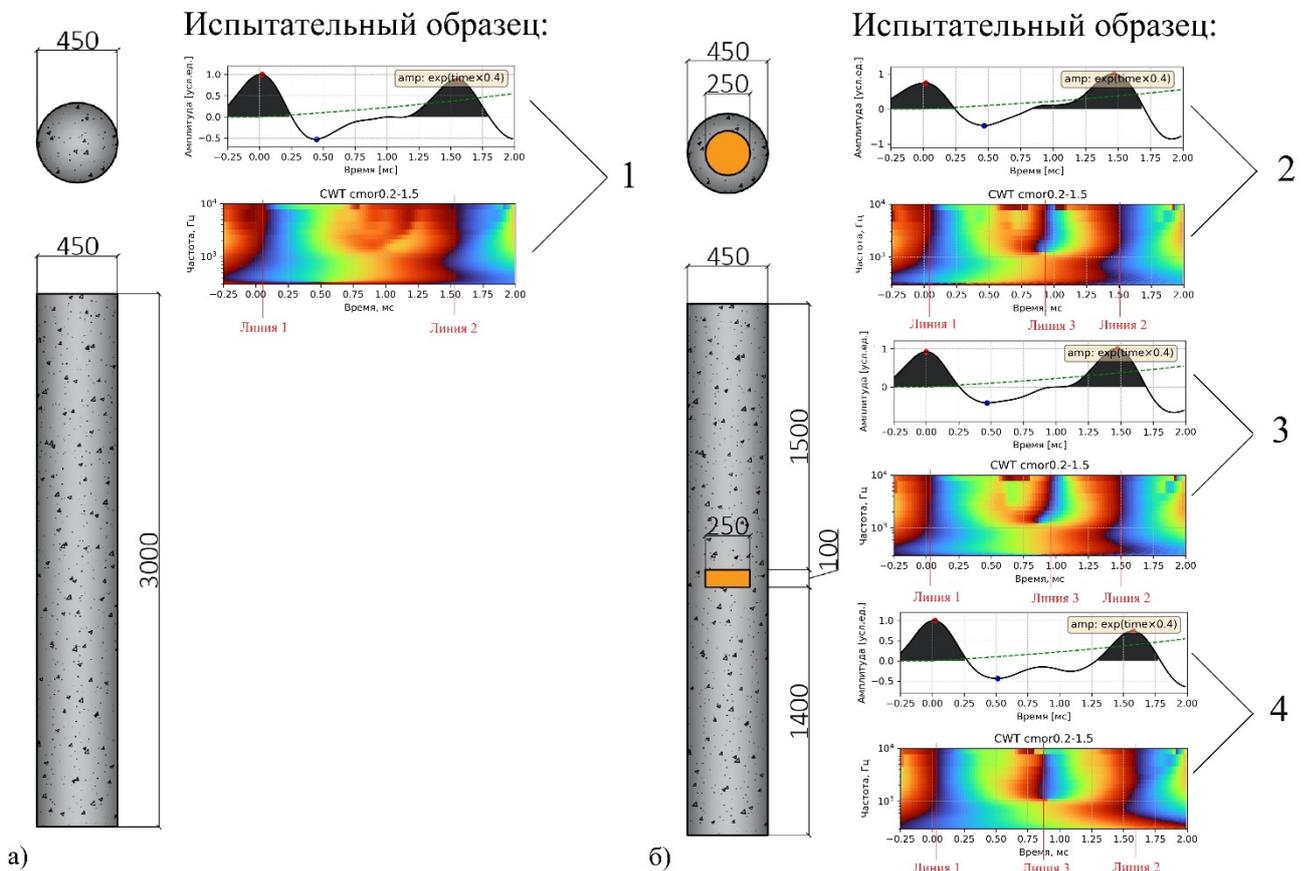


Рисунок 4.1 – Результаты применения комплексного вейвлет-преобразования к данным (сигналам), полученным при испытании: а) бездефектного испытательного образца 1; б) испытательных образцов 2-4 с искусственным дефектом размерами  $100 \times 250$ , имитирующим естественный дефект «размытие бетонной смеси»

Анализируя Рисунок 4.2а-б, можно сделать вывод о том, что смена фазы, которая обозначена Линией 1 и Линией 2, соответствующими входному и отраженному от пята сваи импульсу, также четко прослеживается на всех тест-образцах на 0 мс и 1.6 мс, что при скорости 3800 м/с соответствует длине сваи 3 метра.

Смену фазы, обозначенной Линией 3 и соответствующей отраженному от дефекта импульсу, можно наблюдать на отметке 0.8 мс, что соответствует месторасположению дефекта на отметке 1.5 м.

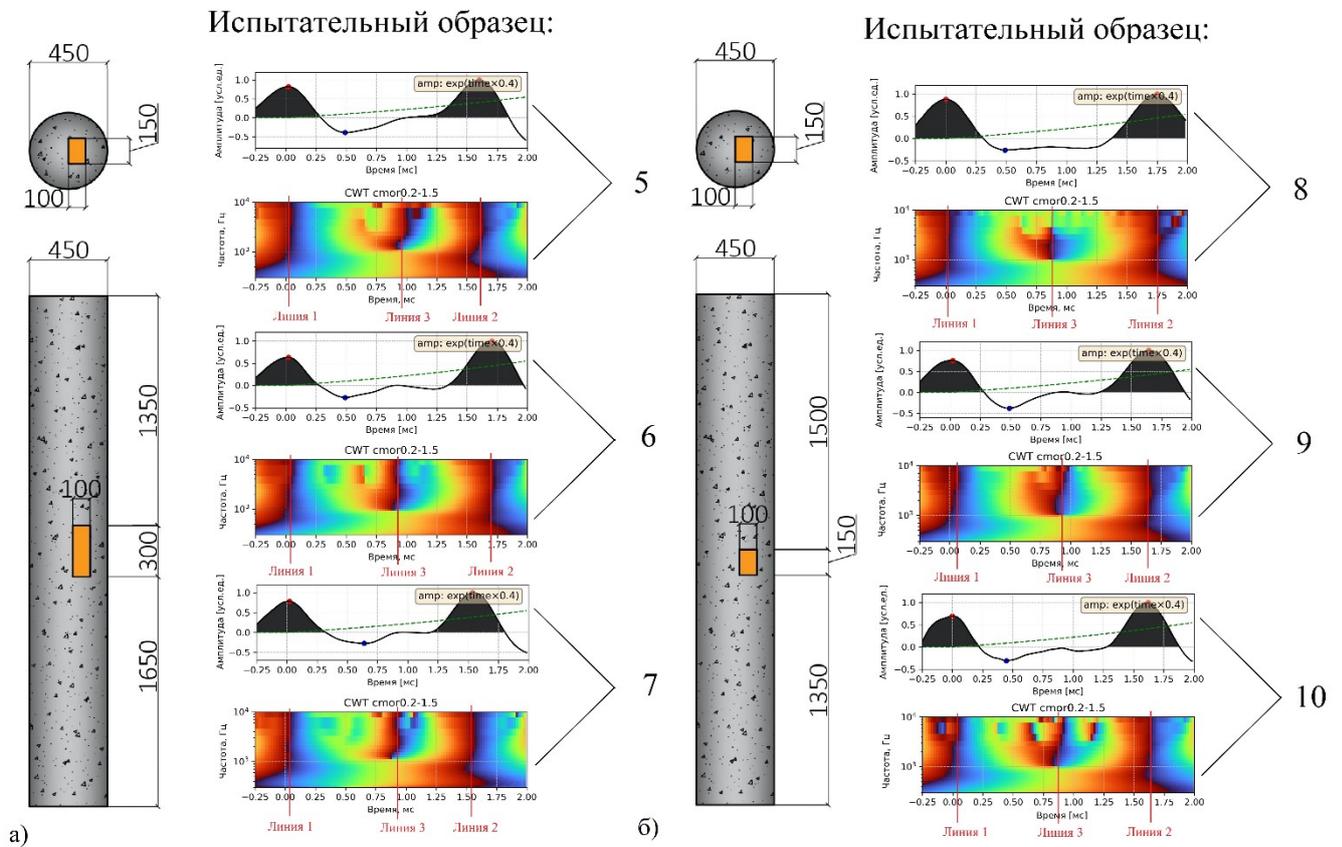


Рисунок 4.2 – Результаты применения комплексного вейвлет-преобразования к данным (сигналам), полученным при испытании: а) испытательных образцов 5-7 с дефектом, имитирующим естественный дефект «включение грунта» размерами 100×150×300; б) испытательных образцов 8-10 с дефектом, имитирующим естественный дефект «включение грунта» размерами 100×150×150

Результаты применения комплексного вейвлет преобразования для анализа данных сигналов, полученных при исследовании испытательных

образцов, подтверждают основные теоретические выводы Главы 2 о возможности повышения достоверности контроля свайных фундаментов, и могут быть положены в основу методики, оценивающей местоположение дефектов и общую длину свай, как части проекта методики сейсмоакустического контроля свай в слабых водонасыщенных грунтах.

Вместе с тем представляет интерес использование классификаторов на основе искусственных нейронных сетей с предварительным обучением для установления типов зафиксированных при контроле свай дефектов.

#### **4.2 Применение классификаторов с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) к данным (сигналам), полученным при испытании испытательных образцов**

На Рисунке 4.3 представлен вид полученного сигнала в трех экспериментах и спектры указанных сигналов. Спектр получен с помощью преобразования Фурье. Используемая в экспериментах аппаратура сразу предоставляет возможность получения данного спектра. Поэтому в дальнейшем при обработке использовался спектр сигнала, полученный с использованием программного приложения прибора. Сигналы Рисунка 4.3 были получены одним датчиком в трех различных экспериментах. На нижнем ряду Рисунка 4.3 показаны результаты этих же трех экспериментов, наложенных друг на друга.

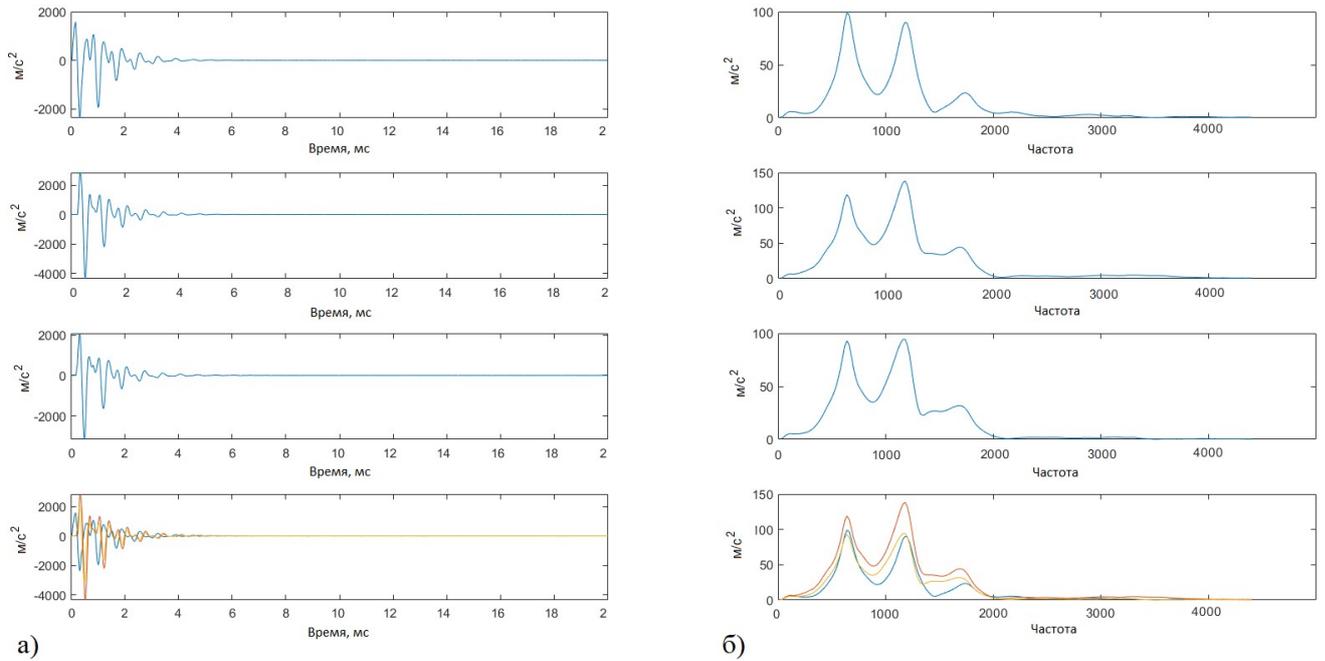


Рисунок 4.3 – Внешний вид части экспериментальных данных (первый датчик, три эксперимента): а) временное представление сигнала; б) спектр сигнала.

Результатом визуального анализа данных является идея о характерных пиках спектральных сигналов, полученных в разных точках эксперимента. Данная идея заложена в основу предлагаемого в данной работе метода обработки.

На Рисунке 4.4. показана работа алгоритма поиска пиков (первых пяти) для одного из сигналов.

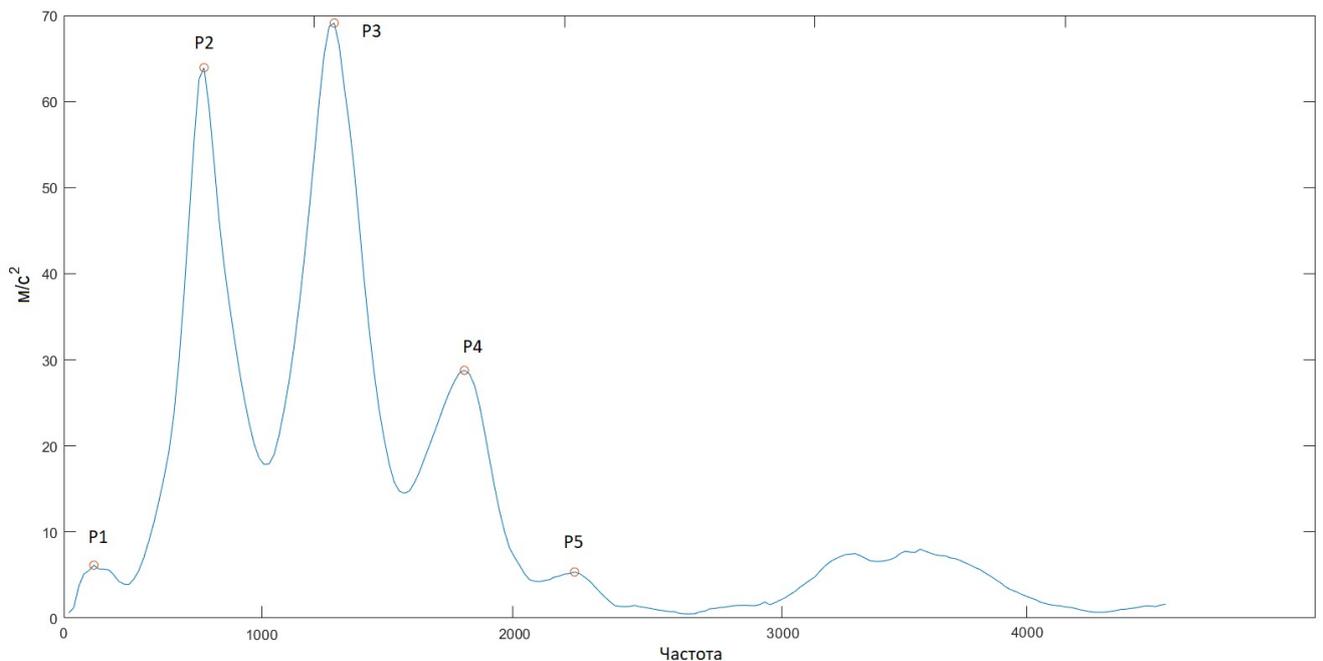


Рисунок 4.4 – Работа алгоритма поиска пиков (первых пяти) для одного из сигналов.

Для формирования тестовых данных и разработки алгоритма для каждого спектра сигнала, полученного в ходе проведения эксперимента были найдены 5 характерных точек. Данные пять точек являются первыми пятью пиковыми точками спектра. Предварительный анализ всех имеющихся данных показал разброс количества пиковых значений для каждого сигнала от 7 до 15. Для начального этапа было выбрано рассмотрение первых пяти пиков. Число 5 дает возможность дополнительно посмотреть влияние количество пиков, выбранных в качестве исходных данных на сходимость алгоритма и качество получаемого решения.

При этом следует подчеркнуть, что оценка влияния количества пиков на работу всего алгоритма будет описана ниже после подбора и доказательства состоятельности предложенного решения.

При работе с пиками данных всех имеющихся сигналов были выявлены следующие закономерности – большинство пиков находились в определённых диапазонах частот. Распределение между рассматриваемым датчиком и нахождением пикового значения в определённом частотном диапазоне представлено в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Распределение нахождения пикового значения по частотным диапазонам

Номер пика	Фактический диапазон значений		Выбранный диапазон значений		Количество значений в выбранном диапазоне (%)
	min	max	min	max	
P1	66	198	88	132	84,58
P2	220	704	594	704	97,51
P3	660	1320	1144	1320	94,53
P4	1232	1980	1694	1914	88,56
P5	1562	3388	1980	2486	86,06

Критерием выбора диапазона значений являлось условие нахождения более 80 процентов значений (пиков) в диапазоне, а также несущественное увеличение процента нахождения при расширении диапазона. Информация, представленная в Таблице 4.1 будет использоваться для усовершенствования алгоритма ИНС-классификатора (классификатора на основе искусственной нейронной сети).

На Рисунке 4.5 показан результат обучения ИНС-классификатора (Confusion matrix-Матрица ошибок) на предварительно обработанных данных методом опорных векторов (Linear SVM) [78].

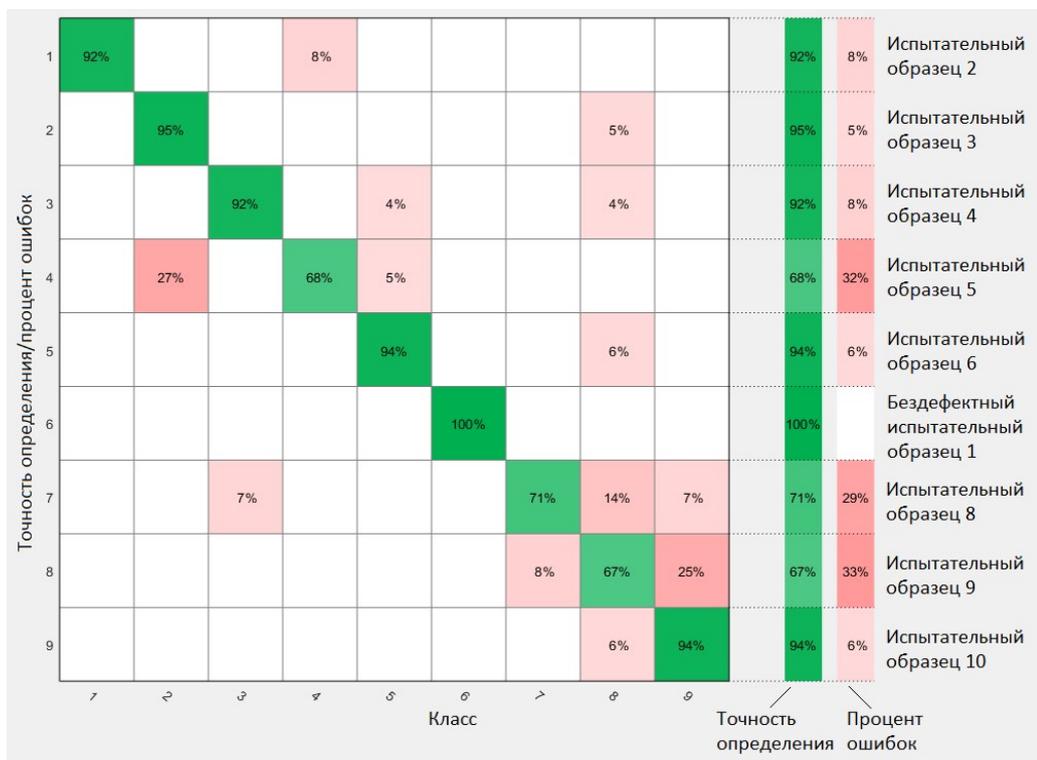


Рисунок 4.5 – Результаты обучения ИНС-классификатора.

Данный ИНС-классификатор был обучен на данных, представляющих собой массив значений, где первые пять значений – первые пять пиковых точек сигнала, а шестое значение - номер класса. При обучении данного классификатора использовалась логика нахождения принадлежности к каждому классу, где под классом понимался датчик, установленный на испытательном образце (свае). Класс 1 - 3 – три датчика на испытательных образцах 2-4, класс 4 - 5 – два датчика на испытательных образцах 5-6, класс 6 – бездефектный испытательный образец 1, класс 7 - 9 соответствует испытательным образцам 8-

10. Как видно из результатов Confusion matrix (Матрица ошибок) при общей точности работы ИНС-классификатора (точность = 85.9%) класс 6 предсказывается правильно с доверительной вероятностью 100 процентов. Это означает что ИНС-классификатор точно предсказывает есть ли дефект в свае или нет. Наибольший процент ошибок (33 %) заложен в определении 8 класса, при этом, как видно, ошибки возникают при ложном определении 7 и 9 класса вместо восьмого. При этом 7, 8 и 9 датчик — это датчики, установленные испытательные образцы 8-10. Вероятно, более правильным с точки зрения постановки задачи является работа ИНС-классификатора, при которой все имеющие случаи делятся на 4 класса вместо 9, подразумевая под каждым классом не установленные датчики, а номера свай, а если точнее, то тип дефекта сваи.

На Рисунке 4.6 показан результат обучения другого ИНС-классификатора Confusion matrix (Матрица ошибок) на предварительно обработанных данных методом Quadratic SVM (Метод опорных векторов).

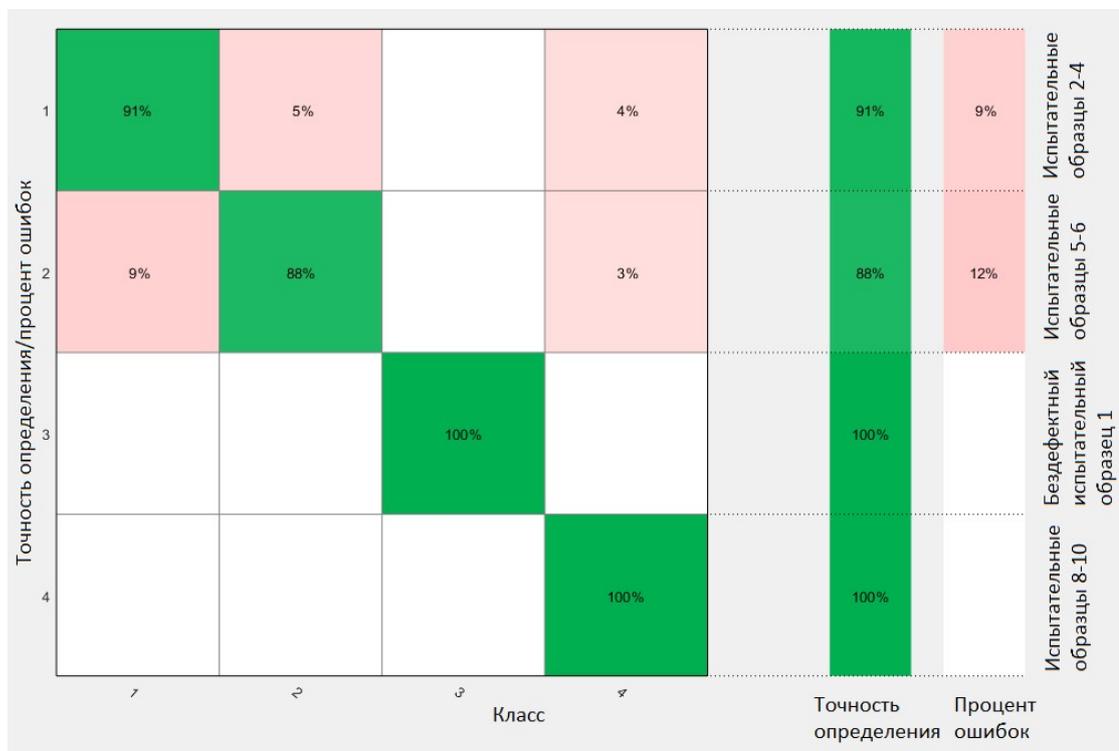


Рисунок 4.6 – Confusion matrix (Матрица ошибок) для ИНС-классификатора

Данный ИНС-классификатор обучался на таких же данных, как и классификатор с результатами, представленными на рисунке 4.5. При этом

классы определялись по дефектам свай. Первый класс – испытательные образцы 2-4; второй класс – испытательные образцы 5-6; 3 класс– бездефектный испытательный образец 1; 4 класс-испытательные образцы 8-10. Полученные результаты показывают точное определение испытательного образца с дефектами, и достаточно высокий результат общей точности (доверительная вероятность 91,9%).

В Таблице 4.2 представлены полные данные об обученных в ходе проведения данной работы ИНС-классификаторах.

Таблица 4.2 – Результаты обучения ИНС-классификаторов.

№ эксперимента	Краткая характеристика	Точность выявления дефектов (доверительная вероятность), %				
		Fine Tree	Liner SVM	Quadratic SVM	Fine KNN	Medium KNN
1	9 классов 5 пиков	72.5	85.9	81.9	82.6	61.7
2	9 классов средние значения диапазона	67.1	87.2	87.9	85.2	73.2
3	4 класса 5 пиков	73.2	71.1	91.9	87.9	71.1
4	4 класса средние значения диапазона	75.8	83.2	93.3	93.3	84.6

В Таблице 4.2 представлены результаты по четырем экспериментам. В эксперименте №1 и №2 в качестве классов использовался каждый датчик, снимающий показания. При этом в качестве входных данных в эксперименте №1 использовались данные первых пяти пиковых точек спектра, а в эксперименте №2

средние значения амплитуд спектра на диапазоне частот для каждой пяти интервалах, указанных в таблице 4.1. В эксперименте №3 и №4 в качестве классов использовался номер типа испытательного образца (1 класс-испытательные образцы 2-4; 2 класс-испытательные образцы 5-6; 3 класс-бездефектный испытательный образец 1; 4 класс- 1 класс-испытательные образцы 8-19). Входные данные использовались аналогично экспериментам №1 и №2.

Как видно из результатов Таблицы 4.2 наилучший результат показал тип классификатора, определяющий 4 типа испытательных образцов, где входными данными были усредненные значения спектра в предварительно найденных диапазонах. Однако стоит подчеркнуть, что результаты во всех случаях были достаточно высокими (доверительная вероятность 80%), следовательно, ИНС-классификатор показал свою состоятельность. При этом особенно следует подчеркнуть, что во всех случаях дефектная свая, определяясь точно. Полученные результаты показывают состоятельность двух подходов – использование ИНС-классификатора сразу для определения дефекта сваи, и использования ИНС-классификатора для определения дефекта с привязкой к условиям работы конкретного датчика. При этом данное решение является промежуточным и требует интерпретации условия работы датчика и дефектов сваи.

Важным вопросом является вопросы внедрения в практику ведения строительных работ разработанных алгоритмов и принципов обнаружения дефектов и применение их в методике контроля на этапе обработки данных и автоматического принятия решений. В данной работе все полученные результаты и выводы были сделаны на основе экспериментальных данных по однородным случаям использования свай. В эксперименте не изменялись длина и диаметр свай, материал и способ заливки. В действительности для внедрения полученных результатов в практическое применение необходимо расширить эксперименты с варьированием других параметров (расширять экспериментальную базу для глубокого обучения). Однако, по предварительной оценке, существенного влияния на используемые в алгоритме методы данные

варианты оказывать не будут, точность ИНС-классификатора и состоятельность в вопросах определения дефектов на данном этапе не вызывает сомнения.

Важными рекомендациями по внедрению ИНС-классификатора для автоматической интерпретации результатов являются следующие:

1. Полученные данные необходимо подвергнуть процессу предварительной обработки. При этом обязательными процедурами должны быть следующие:

Первоначальной операцией преобразования полученного сигнала является оконное преобразование Фурье. Далее необходимо работать с частотным спектром сигнала. При этом стоит подчеркнуть, что оборудование, используемое при проведении эксперимента, уже включало в себя функцию по переводу сигнала из временной в частотную область. Поэтому можно изначально брать этот спектр как начальные данные при обработке.

Использование так называемого глубокого обучения, первой задачей которого должен быть алгоритм, показывающий можно ли применять ИНС-классификатор для полученных данных сигнала или нет. При этом стоит подчеркнуть, что как показали эксперименты, особенно на первых порах вместо ИНС-классификатора может быть применен алгоритм оценки амплитуд на характерных частотах спектра сигнала. Одним из упрощенных подходов является подход при которых сравнивается средняя амплитуда на смежных и указанных выше диапазонах частотах. Случай, когда она будет меньше является условием применения ИНС-классификатора.

Формирование входной матрицы размером  $[1 \times 5]$  для работы классификатора, представляющей собою массив из пяти точек, каждая из которых является вершиной пика спектра сигнала, полученного сейсмоакустическим методом. Целесообразно использовать первые пять пиков, что было доказано в ходе проведения данной работы.

2. Во всех возможных экспериментальных алгоритмах свая без дефектов определялась однозначно с высокой степенью достоверности. В реальных условиях предлагается создать экспериментальную свая для получения такой характеристики и далее, на втором этапе предобработки, использовать алгоритм

для выявления дефектов в принципе, по накопленным данным извне запуская алгоритмы динамической кластеризации находить новые кластеры и изменять классификатор уже непосредственно в приборе с возможностью распознаванием классов дефектов, выявленных динамическими алгоритмами кластеризации.

3. Накапливать историю из данных, сопоставляя характерные точки спектра сигнала с выявленными дефектами. Тем самым при условии несущественного изменения технологии ведения строительных работ, с течением времени можно получить точный ИНС-классификатор, диагностирующий все возможные дефекты. Плюсом наличия такого инструментария является независимость от компетенции человека, интерпретирующего результаты, быстрое получение результата на месте и сохранения данных о дефектах за весь период ведения мониторинга [42].

#### **4.3 Выводы по Главе 4**

1. На основании частотно временного анализа сигналов, полученных при экспериментальных исследованиях испытательных образцов полигона подтверждена возможность выделения первичных информативных параметров, позволяющих определить местоположение искусственных дефектов и оценить длину сваи.

2. Разработанные и примененные для анализа сигналов ИНС-классификаторы по сформулированным признакам позволили разработать процедуру автоматического определения типов дефектов свай.

3. Обоснованы основные положения методики контроля в целом и частной методики измерения геометрических характеристик местоположения дефектов и автоматического определения их типов как основного элемента методики контроля.

4. Оценены метрологические характеристики методики контроля и достоверность классификации дефектов при контроле и выявлены пути их улучшения.

5. Даны рекомендации по совершенствованию предлагаемых алгоритмов и решений в части автоматической интерпретации результатов контроля.

## **ГЛАВА 5 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ (ВАЛИДАЦИЯ) РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ СВАЙ**

Для реализации поставленной при выполнении работы цели потребовалась разработка ряда моделей процессов возбуждения, распространения и регистрации упругих волн, а также алгоритмы обработки и анализа получаемых сигналов при сейсмоакустическом контроле свай, ИНС-классификаторов, положенных в основу разработанной методики контроля свай для выявления дефектов, возникших при их изготовлении (в том числе в производственных условиях), а также для оценки их состояния при необходимости повторного использования во вновь возводимых строительных сооружениях.

Основным условием применения методик обработки измерительной информации (сигналов) и принятия решений без участия человека (в основе которых цифровые модели), как составного атрибута систем неразрушающего контроля, является обеспечение их адекватности. Подтверждение адекватности моделей, технологий их применения и методик проведения контроля (измерения) обеспечивается их верификацией и валидацией.

Верификация моделей процессов обработки измерительной информации и принятия решений была произведена с использованием обоснованного и разработанного комплекта испытательных образцов в составе полигона, что было подробно изложено в Главах 3 и 4 с соответствующими выводами.

Валидация методики контроля предполагает проведение ее исследования на реальных образцах свай, что будет изложено ниже.

### **5.1 Обследование свай, изготовленных в грунте, с применением методики контроля, основанной на фазовом анализе (вейвлет-преобразовании) для фильтрации сигналов.**

#### **5.1.1 Обследование буронабивной сваи большой длины**

Рассмотрим применение разработанной методики и предложенных процедур вейвлет-анализа для сейсмоакустических данных, полученных при испытании (обследовании) буронабивной сваи большой длины.

Предполагаемые размеры сваи: диаметр – 1200 мм, проектная длина – 30 м, класс бетона – В30.

При обследовании для возбуждения сигнала использовался тяжелый молоток с пластиковым бойком, регистрация производилась с использованием комплекта аппаратуры ИДС1 [21].

Полученный в результате испытаний сейсмоакустический сигнал (Рисунок 5.1, слева) осложнен интенсивными структурными помехами, обусловленными конструкцией сваи и применяемыми материалами. Анализ временного представления сигнала на индикаторе прибора не позволяет выделить на нем особенности (выделить амплитудные или временные первичные информативные параметры), которые можно интерпретировать как информационные, для оценки моментов прихода волн, отраженных от нижнего конца сваи.

Рассмотрим результат применения разработанной методики - вейвлет-преобразования к сигналу, полученному с использованием материнского вейвлета Морле с параметром ширины полосы пропускания 0.25 и центральной частотой 1.1 (сиг0.25-1.1), представленный на Рисунке 5.1, справа. Вейвлет-преобразование позволило отделить высокочастотные составляющие сигнала (более 1000 Гц), интерпретируемые в качестве помех (шумов), и выделить менее интенсивные низкочастотные аномалии. Фильтрация сигнала выполнялась путем усреднения значений энергии вейвлет-коэффициентов в пределах диапазона частот 100–700 Гц – расширенной области частотной локализации импульса, отвечающего возбуждению волн в свае. На результате фильтрации (Рисунок 5.1, слева; показан красной сплошной линией) на отметке 16 мс выделяется импульс, интерпретируемый в качестве отражения от нижнего конца сваи, что подтверждает соответствие фактической длины сваи проектному значению (при скорости распространения волн в свае порядка 3750 м/с) [100].

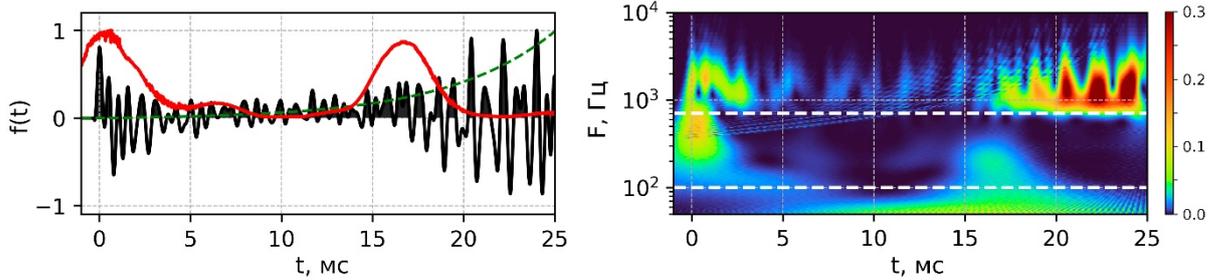


Рисунок 5.1 – Результаты вейвлет-анализа сейсмоакустического сигнала, зарегистрированного при испытании буронабивной сваи с проектной длиной 30 м (материнский вейвлет – `stog0.25-1.1`). Результат вейвлет-фильтрации показан на левой панели красной сплошной линией

### 5.1.2 Полевые испытания (обследование) железобетонных свай, в составе действующих сооружений.

Первый объект – мостовой переход в Московской области. Фундамент опор постройки начала 50-х годов состоял из ростверка толщиной около 1,5 м, опирающегося на восьмигранные сваи неизвестной длины. Второй объект – реконструируемое здание, расположенное в ЦАО г. Москвы. Фундамент сооружения состоял из подколонных ростверков толщиной 0,8 м, объединяющих 4-6 призматических свай сечением 30x30 см. Основной задачей исследования являлось получение данных о глубине заложения существующих опор.

В обоих случаях сваи были включены в состав массивных конструкций, информация об их положении в плане отсутствовала. Поэтому попыток определения длины свай с возбуждением упругих волн на поверхности ростверков не предпринималось. Было принято решение об организации доступа к боковой грани свай с помощью шурфов. Прием и возбуждение акустических волн производились с заранее подготовленных площадок, вырубленных в теле свай на расстоянии около 40 сантиметров от низа ростверка (Рисунок 5.2).



а)



б)

Рисунок 5.2 – Проведение полевых испытаний на первом (а) и втором (б) объектах

В качестве измерительного оборудования использовался комплект аппаратуры ИДС-1 с одним регистрирующим датчиком [21]. В качестве ударного источника применялись два вида ударников – металлического молотка весом 200 г и резиновой киянки весом 400 г.

Обработка данных выполнялась в программе GeoTechControl (ООО «ГЕОДЕВАЙС», Россия) по следующему графу: сборка в сейсмограммы, амплитудная коррекция (усиление сигнала), двумерная фильтрация. В качестве скорости распространения упругих волн было выбрано достаточно низкое значение 3600 м/с, позволяющее избежать переоценки глубины заложения свай.

Результаты обработки данных представлены в виде сейсмограмм на Рисунке 5.3. Сплошными синими линиями выделено положение акустических аномалий, соответствующих возбуждению волн и предполагаемому отражению от нижнего конца сваи [30].

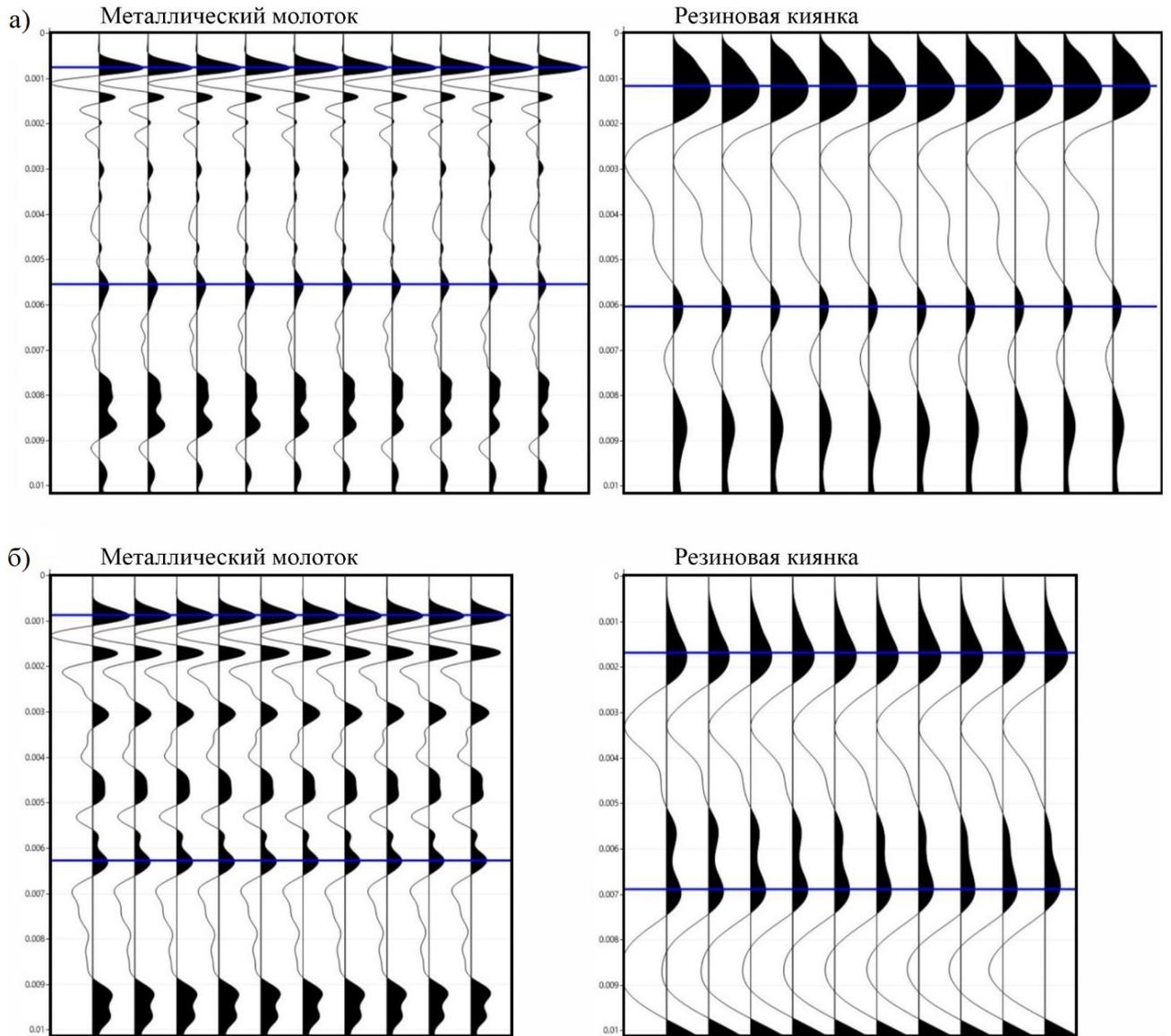


Рисунок 5.3 – Примеры результатов полевых испытаний на первом (а) и втором (б) объектах. Масштаб по временной оси дан в секундах

Данные для фундамента, обследованного на первом объекте, позволяют продемонстрировать преимущества методики разночастотного возбуждения. Сигналы, полученные с использованием металлического молотка, осложнены помехой от ростверка опоры моста, однако совместная интерпретация сейсмограмм для обоих ударных источников позволяет выделить отражение, которое можно связать с нижним концом сваи. Определенная длина составила 8,6 м для металлического молотка и 8,8 м для резиновой киянки – 8,7 м в среднем.

Сигналы, зарегистрированные на свае объекта 2, осложнены акустическими помехами большей интенсивности. Из-за этого данные для металлического молотка практически не поддаются интерпретации. Однако по данным резиновой киянки можно предположить целевое отражение. Определяемая по данным киянки длина сваи – 9,4 м. Выделяемое по аналогии отражение для металлического молотка дает оценку в 9,7 м.

Применение описанной выше методики обработки на базе вейвлет-преобразования сигналов, полученных при обследовании свай под ростверком на объекте 1 и объекте 2 при помощи металлических молотков, осложненных различного рода акустическим шумом приведено ниже. В качестве материнской функции использовался вейвлет Морле со значениями параметров ширины полосы пропускания 0,1 и центральной частоты 1,5.

На результатах вейвлет-фильтрации сигналов объекта 1 на отметке 4,8 мс выделяется импульс, который можно интерпретировать в качестве отражения от нижнего конца сваи. Оценка длины сваи в данном случае составляет ~8,6 м, что показывает хорошую сходимость с результатами, полученными с использованием разночастотного возбуждения (Рисунок 5.4а).

Применение вейвлет-анализа для сигналов объекта 2 не позволяет достоверно оценить длину испытываемой сваи. Аномальные значения энергии вейвлет-коэффициентов концентрируются в диапазонах частот, отличных от области частотной локализации импульса, соответствующего возбуждению волн в свае (Рисунок 5.4б).

Таким образом, можно отметить, что в случае объекта 1 применение вейвлет-анализа стало хорошей альтернативой использованию разночастотного возбуждения при проведении измерений. В случае объекта 2 вейвлет-анализ не позволил выделить составляющие сигнала, интерпретируемые в качестве полезных.

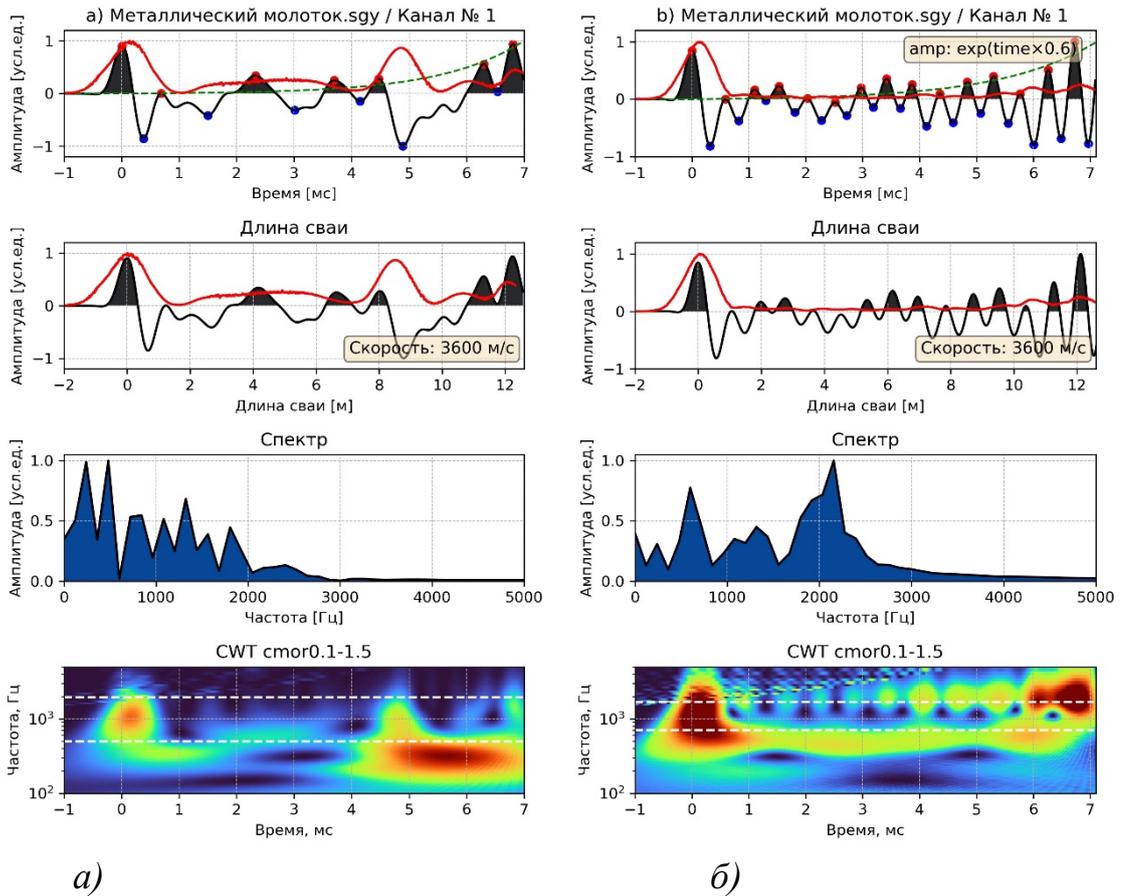


Рисунок 5.4 – Результаты вейвлет-преобразования для объекта 1 (а) и объекта 2 (б). На панелях представлены (сверху вниз): сигналы во временной области с выделенными положительными и отрицательными амплитудными пиками; сигналы со шкалой времен, пересчитанной в шкалу глубин; амплитудные спектры сигналов; вейвлетограммы с выделенными пунктиром частотными интервалами, выбранными для итогового анализа. Красными сплошными линиями на первых двух рядах рисунка показан результат вейвлет-фильтрации сигналов [106]

В подобных случаях представляется перспективным выполнять интерпретацию (окончательное решение) с использованием статистической обработки результатов сейсмоакустического обследования для нескольких свай одновременно, в которое будут входить как результаты анализа данных для различных ударных источников, так и применение специфических методик обработки.

## **5.2 Обследование составных свай заводского изготовления в составе свайных фундаментов при реконструкции объектов гражданского строительства с использованием разработанной методики.**

Как было описано выше, разработанная методика в составе комплекса аппаратных и программных средств может применяться для контроля составных свай заводского изготовления, при необходимости их повторного использования свайного фундамента (возведения нового объекта на имеющемся свайном фундаменте).

Вышеописанная методика была применена на двух строительных площадках Санкт-Петербурга.

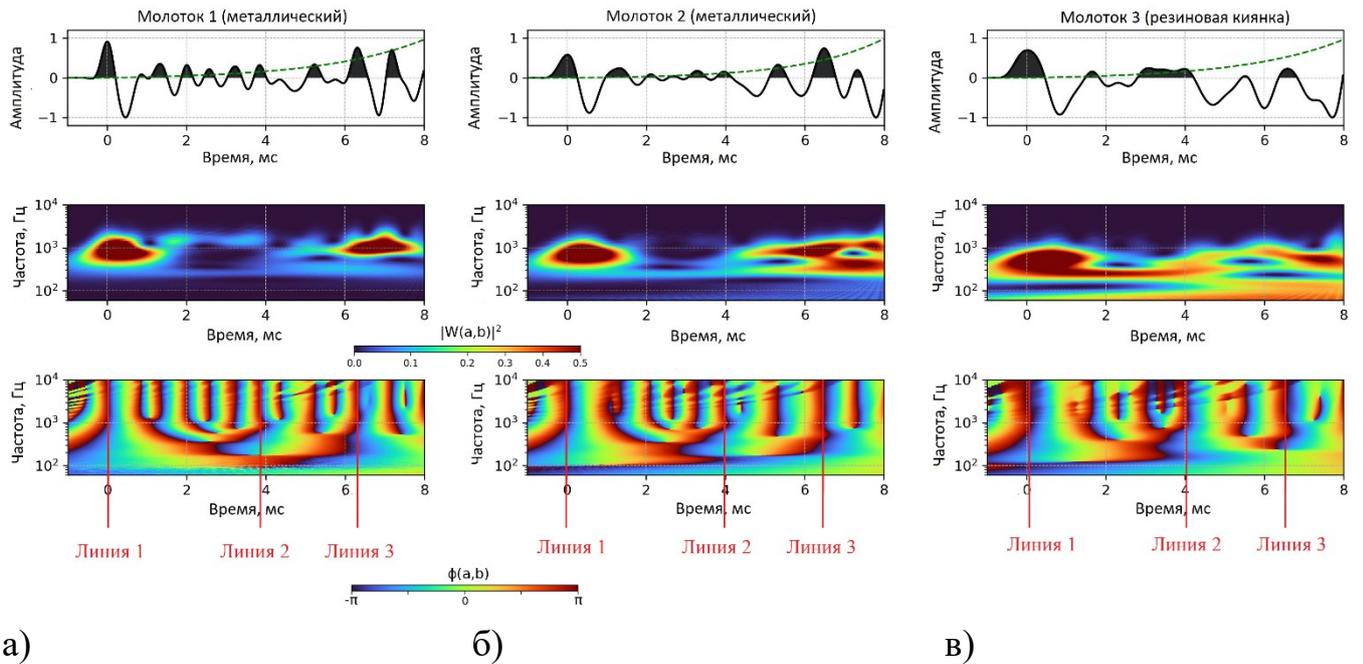
На первом объекте существующее здание планировалось сносить, а свайный фундамент использовать повторно. Ввиду отсутствия исполнительной документации необходимо было определить длину для расчета несущей способности свай и убедиться в ее сплошности, в том числе в месте стыка.

Испытание проводилось с отметки ростверка колонны высотой 1 м. Для возбуждения акустической волны использовались металлические молотки весом 100 и 200 грамм и резиновая киянка весом 500 грамм.

Полученные сигналы (Рисунок 5.5) при помощи сейсмоакустического метода не удалось однозначно интерпретировать и определить параметры и состояние свай.

Для повышения достоверности результатов была применена методика комплексного вейвлет-преобразования для обработки полученных полевых данных.

Анализируя фазовый спектр, можно отметить изменение фазы сигналы в моменты 4 (Линия 2) и  $\sim 6.5$  мс (Линия 3), что соответствует длине секции 8 м и общей длине свай 13 м. Однако, принимая во внимание высоту ростверка, с отметки которого производилось испытание, можно сделать вывод о длине верхней секции 7 м и общей длине свай 12 м [54].



а) б) в)  
 Рисунок 5.5 – Результаты применения комплексного вейвлет-преобразования к сигналам, полученным при обследовании свай на первом объекте с использованием: а) металлического молотка 100 грамм; б) металлического молотка 200 грамм; в) резиновой киянки 500 грамм

На втором объекте также отсутствовала исполнительная документация и после сноса сооружения свайные фундаменты планировалось использовать повторно. На момент проведения испытаний свая была частично откопана, то есть был предоставлен доступ к оголовку. Для возбуждения акустической волны использовался молоток с пластиковым наконечником.

Анализируя полученные результаты (Рисунок 5.6), можно наблюдать смену фазы в моменты 3.5 (Линия 2) и 7 мс (Линия 3), что соответствует длине секции 7м и общей длине сваи 14 м.

Спустя некоторое время после проведения испытания по определению длины сваи были откопаны. Длина, определенная при помощи сейсмоакустического метода, совпала с длиной откопанной сваи.

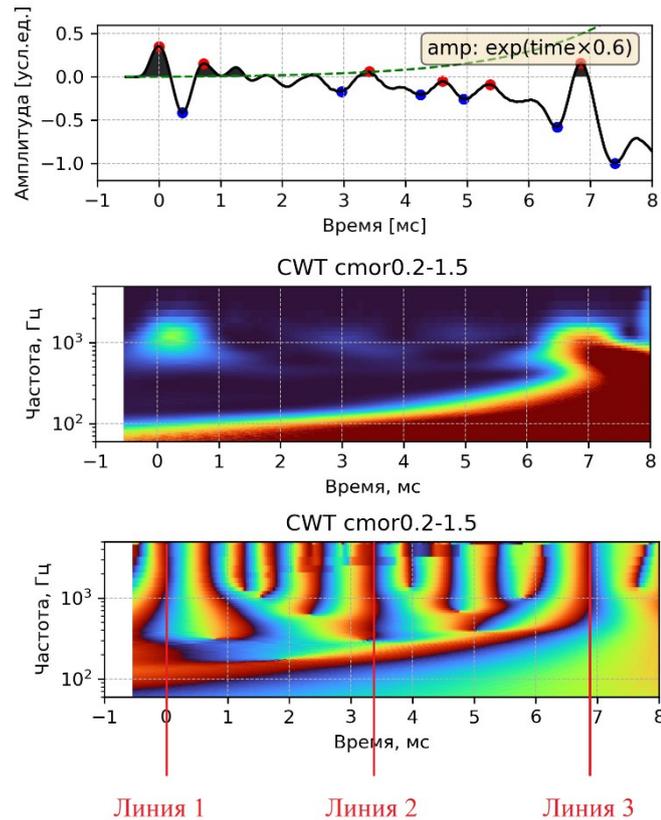


Рисунок 5.6 – Результаты применения комплексного вейвлет-преобразования к сигналам, полученным при обследовании свай на втором объекте с использованием молотка с пластиковым наконечником

### 5.3 Выводы по Главе 5

1. Результаты практического применения методики контроля показали, что использование результатов сейсмоакустического контроля свай заводского изготовления и свай, устраиваемых в грунте без дополнительной обработки данных (сигналов) не позволяет сделать достоверных выводов о состоянии сваи и оценить ее длину

2. Использование разработанных алгоритмов частотно-временной обработки сигналов позволяет получить достоверно интерпретируемые результаты, позволяющие оценить структуру и состояние свай, а также их длину.

3. Проведенные практического применения позволяют говорить о валидации основных положений методики контроля свай – получении доказательств того, что требования, предъявляемые к методике при ее практическом применении в целом удовлетворены.

4. Сформулированы рекомендации по доработке нормативной документации и ее применению при возведении свайных фундаментов в Санкт-Петербурге и других регионах с аналогичными характеристиками грунтов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная научно-техническая задача повышения достоверности сейсмоакустического контроля свайных фундаментов, возводимых в слабых водонасыщенных грунтах, путем совершенствования методик получения и обработки сигналов, а также последующего анализа данных. Выполненные исследования позволили реализовать методику контроля свайных фундаментов и сформулировать предложения по корректировке нормативной документации. На основании проведенных исследований получены нижеперечисленные научные результаты работы.

1. Проведенный анализ особенностей грунтов Санкт-Петербурга и технологий изготовления свай в их среде позволил классифицировать дефекты в теле сваи, а также установить процессы их возникновения при формировании свайных фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах.

2. Моделирование процесса возбуждения и распространения акустических колебаний в свайных фундаментах позволило выявить ограничения применения сейсмоакустического метода для оценки длины и сплошности свай, изготавливаемых в слабых водонасыщенных грунтах, и предложить решение, основанное на фазовом анализе мультисигналов в частотно-временном представлении, для повышения разрешающей способности метода.

3. Обосновано применение методики комплексного вейвлет-преобразования для фазового анализа сигналов в частотно-временном представлении, позволяющего выявлять дефекты в сваях, устраиваемых в слабых водонасыщенных грунтах, а также локализовать стык в сваях заводского изготовления и оценить их общую длину.

4. Обоснована и разработана методика изготовления и аттестации испытательных образцов свай с искусственными дефектами для экспериментального исследования метода и технологии контроля применительного к сваям, возводимых в слабых водонасыщенных грунтах

5. Разработана методика контроля свайных фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах, основанная на многочастотном ударном возбуждении упругих волн в теле сваи и последующем анализе получаемых акустических сигналов в частотно-временной области с использованием фазы комплексного вейвлет-преобразования и классификаторов на основе искусственных нейронных сетей, позволяющая расширить перечень и повысить достоверность выявления дефектов свай в условиях слабых водонасыщенных грунтах и других регионах с аналогичными характеристиками грунтов.

6. С использованием тестовых и реальных образцов свай проведены экспериментальные исследования принципов и процессов контроля, обеспечивающих выявление дефектов и оценку длины сваи с требуемыми метрологическими характеристиками, на основе которого сформулированы рекомендации по доработке нормативной документации и ее применению при возведении свайных фундаментов в Санкт-Петербурге и других регионах с аналогичными характеристиками грунтов.

Дальнейшие исследования по данной тематике будут направлены на повышение информативности и достоверности сейсмоакустического контроля свайных фундаментов путем разработки и совершенствования инструментов для обработки полученных сигналов, сбора полевых данных для обучения искусственной нейронной сети, а также доработки соответствующей нормативной документации.

## СПИСОК ТЕРМИНОВ

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

тело сваи: Конструкция, состоящая из бетона и арматурного каркаса, верхняя часть которой называется оголовком, а нижняя-пятой.

сплошность сваи: Показатель качества укладки бетонной смеси, характеризующий непрерывность материала и отсутствие аномальных зон (грунтовые включения, каверны и т.д).

сваи заводского изготовления: Предварительно изготовленные сваи, погружаемые в грунт за счет вытеснения или путем устройства в лидерные скважины при помощи вибропогружателей или других устройств.

сваи, устраиваемые в грунте: Железобетонные монолитные набивные и буронабивные сваи, изготовленные непосредственно на строительной площадке, путем бетонирования и армирования скважины.

входной импульс: Сигнал внешней вертикальной силы в виде гауссовых импульсов, модулированных окном Ханнинга, форма которых зависит от вида ударного источника

ударные источники: Набор молотков разных весов с различным материалом насадки: легкие металлические молотки, тяжелые киянки с пластиковыми и резиновыми наконечниками.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архангельский, Б.Н. Подземные воды Главного девонского поля в пределах Ленинградской области / Б.Н. Архангельский // Гидрогеологический очерк Ленинградской области. – 1936. – 174 с.
2. Ауслендер, В.Г. Отчет о комплексном геологическом, гидрогеологическом и инженерно-геологическом доизучении масштаба 1:50000 с общими поисками и геоэкологическим картированием территории г. Санкт-Петербурга и его окрестностей / В.Г. Ауслендер, Н.Г. Андреева, Н.А. Боровикова // Фонды ФГУ СЗ РФГИ. – 2001.
3. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
4. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Высш. Шк., 1987. – 415 с.
5. Берг, О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О.Я. Берг. – М.: Госстройиздат, 1961. – 96 с.
6. Болгаров, А.Г. Межскважинная сейсмическая томография для решения инженерно-геологических задач / А.Г. Болгаров, Ю.В. Рослов // Технологии сейсморазведки. – 2009. - №1. – С. 105-109.
7. Владов, М.Л. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.
8. Гельмерсен, Г.П. О физических и геологических условиях Петербурга / Г.П. Гельмерсен. – СПб: Императорская Академия Наук. –1864. – 11 с.
9. Геологический атлас Санкт-Петербурга. –СПб. – 2009. – 57 с.
10. ГОСТ 10181.1-81. Смеси бетонные. Методы определения удобоукладываемости. – 2016. – 13 с.
11. ГОСТ 14098-2014 Соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. - М.: Стандартиформ, 2015. – 22 с.
12. ГОСТ 19804-2012 Сваи железобетонные заводского изготовления. Общие технические условия. – М.: Стандартиформ, 2014. – 19 с.

13. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2018. – 24 с.
14. ГОСТ 8510-86 Уголки стальные горячекатаные неравнополочные. - М.: Стандартинформ, 1986. – 5 с.
15. ГОСТ 9.602-2016 Межгосударственный стандарт. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Стандартинформ, 2016. – 87 с.
16. ГОСТ Р «Контроль неразрушающий. Общие требования к разработке и аттестации методик неразрушающего контроля»
17. Дашко, Р.Э. Инженерно-геологические проблемы строительства высотных зданий в Санкт-Петербурге в условиях освоения подземного пространства / Р.Э. Дашко, А. М. Жукова // Записки Горного института. – 2011. – Т.189. – С. 18-22.
18. Дашко, Р.Э. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга / Р.Э. Дашко, О.Ю. Александрова, П.В. Котюков, А.В. Шидловская // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2011. – № 13 –25 с.
19. Дмитриев, А.А. Отчет об инженерно-геологическом и гидрогеологическом картировании территории Ленинграда в масштабах 1:25000 и 1:50000 для обоснования генерального плана развития города с учетом использования подземного пространства, 1984-1989 гг (центральная и южная части г. Ленинграда). / А.А. Дмитриев // Фондовая литература. – 1989 г.
20. Ерофеев, В.И. Волны в стержнях. Дисперсия. Диссипация. Нелинейность / В.И. Ерофеев, В.В. Кажаяев, Н.П. Семерикова. – М.: Физматлит, 2002. – 208 с.
21. Измеритель длины свай ИДС-1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geo-ndt.ru/pribor-9846-izmeritel-dlini-svai-ids-1.htm>
22. Казимиров, И.А. К вопросу о прогнозировании развития коррозионных процессов в конструкциях стальных свай, работающих в контакте с грунтом / И.А. Казимиров, А.В. Долгих // Universum: Технические науки: электрон. научн. журн. – 2019. – 6(63). – Режим доступа: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/7495>

23. Капустин, В.В. Возможности сейсмоакустических и ультразвуковых методов при контроле качества свайных фундаментов / В.В. Капустин, А.А. Чуркин, И.Н. Лозовский, А.В. Кувалдин // Геотехника. – 2018. – Т.10, № 5–6. - С.62–71.

24. Капустин, В.В. Проблемы малоглубинной сейсморазведки и георадиолокации в составе инженерно-геологических изысканий. Применение волновых методов для неразрушающего контроля фундаментных конструкций: учебное пособие / В.В. Капустин, А.Ю. Хмельницкий. – Астрахань: Университетская книга, 2013. – 116 с.

25. Квятковский, Г.И. Метод сопротивления заземления в инженерной геофизике / Г.И. Квятковский. – М.: Недра, 1993. - 90 с.

26. Кольский, Г. Волны напряжения в твердых телах / Г. Кольский. – М: Изд-во иностранной литературы, 1953. – 194 с.

27. Куторга, С.С. Геогностическая карта Санкт-Петербургской губернии / С.С. Куторга. – СПб. – 1852.

28. Лаврова, М.А. Основной разрез верхнего плейстоцена Ленинградского района / М.А. Лаврова // Вопросы стратиграфии четвертичных отложений северо-запада европейской части СССР. –1962. – С. 125-139.

29. Лозовский, И.Н. Контроль сплошности буронабивных свай методом межскважинной ультразвуковой томографии / И.Н. Лозовский, А.А. Чуркин // Транспортное строительство. – 2018. – №7. – С. 6-9.

30. Лозовский, И.Н. Фильтрация данных сейсмоакустического контроля сплошности свай с использованием непрерывного вейвлет-преобразования / И.Н. Лозовский, Е.С. Лосева, В.А. Сясько // Контроль. Диагностика. – 2022. – № 9. – С. 36-45.

31. Ляв, А. Математическая теория упругости / А. Ляв. – М.-Л.: Объединенное научно-техническое изд-во НКТП СССР, 1935. – 675 с.

32. Мангушев, Р. А. Современные свайные технологии: учебное пособие / Р.А. Мангушев, А.В. Ершов, А.И. Осокин. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. - 235 с.

33. Мангушев, Р.А. Геотехника Санкт-Петербурга: Монография / Р.А. Мангушев, А.И. Осокин. – М.: Издательство АСВ, 2010. – 264 с.
34. Мангушев, Р.А. Основания и фундаменты / Р.А. Мангушев, В.Д. Карлов, И.И. Сахаров, А.И. Осокин. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2011. – 280 с.
35. Марков, К.К. Развитие рельефа северо-западной части Ленинградской области / К.К. Марков // Труды главного Геолого-разведочного управления ВСНХ СССР. – 1931. – Вып. 117 – 256 с.
36. Миндлин, Я.А. Распространение волн по поверхности бесконечно длинного кругового цилиндра / Я.А. Миндлин // ДАН СССР. – 1946. – Т.52. – №2. – С. 107-110.
37. Москаленко, П.Е. Отчет о работе по теме № 787 (объект «Кронштадский»). / П.Е. Москаленко, С.М. Федоров // Фондовая литература. –1994 г.
38. Мухин, А.А. О техническом регулировании неразрушающего контроля сплошности свай / А.А. Мухин, В.В. Капустин, А.А. Чуркин, И.Н. Лозовский // Геотехника. – 2019. – Т.10. – №2. – С. 80-89.
39. Мухин, А.А. Ограничения области применения сейсмоакустического метода контроля сплошности бетона свай / А.А.Мухин, А.А.Чуркин, И.Н.Лозовский // Транспортное строительство. — 2018. — № 9. — С. 20–24.
40. Мухин, А.А. Технические стандарты ООО ЭГЕОС по применению неразрушающего контроля сплошности свай. Сейсмоакустический метод / А.А. Мухин, И.Н. Лозовский, А.А. Чуркин // Геотехника. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 68–78.
41. Погребов, Н.Ф. Развитие гидрогеологических работ во второй пятилетке в Северном крае и Ленинградской области / Н.Ф. Погребов // Геологоразведочные работы во втором пятилетии: материалы конференции. –1932. – С. 207-210.
42. Программа для ЭВМ № 2023610021 Российская Федерация. Программа для выявления дефектов буровых и буронабивных свай на основе данных, полученных сейсмоакустическим методом, в полевых условиях: № 2022684877: заявл.

15.12.2022: опубл: 10.01.2023 / Котелева Н.И., Лосева Е.С., Сясько В.А.: заявитель Санкт-Петербургский горный университет. -1 с..

43. Проект ПНСТ Стандартизация в Российской Федерации. Сваи. Сейсмоакустический метод контроля длины и сплошности. – 2022. – 40 с.

44. Рэлей, Дж. Теория звука. В 2-х томах. Том 1 / Дж. Рэлей - М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. – 504 с.

45. Серия 1.011.1-10 Сваи забивные железобетонные. Выпуск 8. Сваи составные сплошного квадратного сечения с ненапрягаемой арматурой. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 108 с.

46. Соловьева, В.А. Отчет о инженерно-геологическом и гидрогеологическом картировании территории г. Ленинграда в масштабах 1:25000 и 1:50000 для обоснования генерального плана развития города с учетом использования подземного пространства, 1980-1984 гг. Северная и северо-восточная части г. Ленинграда / В.А. Соловьева // Фондовая литература. – 1989 г.

47. Спиридонов, М.А. Изменение береговой зоны восточной части Финского залива под воздействием природных и антропогенных факторов / М.А. Спиридонов, Д.В. Рябчук, К.К. Орвику // Региональная геология и металлогения. – 2010. – № 41. – С. 107-118.

48. Странгвейс, У. Геогностическое описание Санкт-Петербургских окрестностей / У. Странгвейс // Тр. Минералогического общества – СПб. – 1830. – Т.1. –С.1-96

49. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. N 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (с изменениями на 11 июня 2021 года года, редакция, действующая с 28 декабря 2021 года).

50. Хмельницкий, А.Ю. Экспериментальное и теоретическое исследование волновых движений в системе свая-грунт с целью усовершенствования акустического метода обследования свай: дис. канд. тех. наук: 25.00.10 / Хмельницкий Артем Юрьевич. – М., 2013. – 127 с.

51. Цуканов, А.А. Моделирование волн Рэля в неоднородной среде с использованием вычислительных систем с параллельной архитектурой: учебное

пособие / А.А. Цуканов, Д.И. Калабухов, А.И. Романов. – Физический факультет МГУ, 2010.

52. Чуркин, А.А. Развитие методики применения геофизического комплекса для контроля качества заглубленных монолитных конструкций: дис. канд. тех. наук: 25.00.10 / Чуркин Алексей Андреевич – М., 2020. - 162 с.

53. Чуркин, А.А. Исследование влияния параметров системы «свая–грунт» на динамические атрибуты акустического сигнала с использованием численного моделирования/А.А. Чуркин, В.В. Капустин, И.Н. Лозовский, Р.А. Жостков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – №1. – С. 129-140.

54. Чуркин, А.А. Приемы повышения достоверности оценки длины свай в составе существующих сооружений при обследовании сейсмоакустическим методом / А.А. Чуркин, Е.С. Лосева, И.Н. Лозовский, В.А. Сясько // Контроль. Диагностика. – 2022. – № 10. – С. 24-32.

55. Шишкина, М.А. К вопросу о разрешающей способности межскважинной лучевой сейсмической томографии / М.А.Шишкина, И.В.Фокин, С.А.Тихоцкий // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 1. – С. 5–21.

56. Amir, J.M. Integrity Testing 2nd edition [Электронный ресурс] / J.M. Amir. – 2015. – Режим доступа: <http://www.piletest.com>

57. Amir, J.M. Pile Integrity Testing: History, Present Situation and Future Agenda / J.M. Amir // Proceedings of 3rd Bolivian International Conference Deep Foundations. – 2017. P. 17-32.

58. Amir, J.M. Single-Tube Ultrasonic Testing of Pile Integrity / J.M. Amir // International Deep Foundations Congress. – 2002. –V.1. – 836-850.

59. Arab, M. G. Numerical Modeling of Unfavorable CFA Pile Drilling Conditions / M.G. Arab, M. Abdelmoghni, S.A.Y. Akl, A. Dif // Geotechnical and Geological Engineering. – 2020. – V. 38. – №. 6. – P. 6869–6889.

60. ASTM D5882. Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations // ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, [www.astm.org](http://www.astm.org)

61. ASTM D6760. Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing // ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

62. Bateman, R.M. Chapter 6 - Gamma-gamma density logs / R. M. Bateman.– Elsevier, 2020.–P. 93–105.

63. Chai, H-Y. Detection of shallow anomalies in pile integrity testing / H-Y. Chai, K-K. Phoon // International Journal of Geomechanics. – 2013. –13. – P. 672–677.

64. Chan, H.F.C. Non-destructive testing of concrete piles using the sonic echo and transient shock methods: A thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy [Электронный ресурс] / Hon-Fung Cyril Chan. – University of Edinburgh, 1987. – P. 252.

65. Clough, R.W. Dynamics of Structures / R. W. Clough, J. Penzien. – New York, NY, USA, 1975. – 752 p.

66. Cui, D-M. Towards intelligent interpretation of low strain pile integrity testing results using machine learning techniques / D-M. Cui, W. Yan, X-Q. Wang, L-M. Lu // Sensors. – 2017. – V.17. –№11.– 2443.

67. Dashko, R.E. Underground space of Saint-Petersburg as a multicomponent system: engineering geological and geotechnical aspects of its development / R.E. Dashko, I.V. Alexeev // Proceedings of 13<sup>th</sup> Baltic Sea Geotechnical Conference. –2016. – P. 78 - 84.

68. Dashko, R.E. Engineering geological and geoenvironmental problems of St. Petersburg centre / R.E. Dashko, A.V. Shidlovskaya // Proceeding of the International Symposium and 9th Asian Regional Conference of IAEG “Global View of Engineering Geology and the Environmental”. – 2013. – P. 515 - 521.

69. Fleming, K. Piling Engineering 3d edition/ K. Fleming, A. Weltman, M. Randolph, K. Elson. – CRC Press, Taylor and Francis Group, 2008. – 408 p.

70. Fleming, W.G.K. The understanding of continuous flight auger piling, its monitoring and control / W.G.K. Fleming // Proceedings, Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering. – 1996. – 237 p.

71. Flynn, K.N. Driven cast-in-situ piles installed using hydraulic hammers: Installation energy transfer and driveability assessment / K.N. Flynn, B. A. McCabe // *Soils and Foundations*. – 2019. – V. 59 – №. 6 – P. 1946–1959.

72. Gavin, K. The Shaft Capacity of CFA Piles in Sand / K. Gavin, D. Cadogan, K.G. Gavin, D. Cadogan, P. Casey // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2009. – 135 (6). – P. 790-798.

73. Hameedi, K., Field study on soft soil improvement using continuous flight auger (CFA) piles / K. Hameedi // *International Journal of GEOMATE*. – 2021. – V. 21. – №. 86. –P. 159-166.

74. Healy, P.R. Survey of problems associated with the installation of displacement piles / P.R. Healy, A.J. Weltman // *CIRIA Report PG8*. –1980. – 54 p.

75. JGJ 106-2003, Technical code for testing of building foundation piles// China Academy of Building Research, 2003.

76. Kim, H-J. Guidelines for impact echo test signal interpretation based on wavelet packet transform for the detection of pile defects / H-J. Kim, J.L. Mission, P.R Dinoy, H-S. Kim, T-W. Park // *Applied Sciences*. –2020. – V.10. – №7. – 2633.

77. Klingmuller, O. Sonic echo pile integrity testing and quality control / O.Klingmuller // *Ground engineering*. – 1993. – V. 26.

78. Koteleva, N.I. Development of an Algorithm for Determining Defects in Cast-in-Place Piles Based on the Data Analysis of Low Strain Integrity Testing / N.I. Koteleva, E.S. Loseva // *Applied Sciences*. – 2022. – 12. – №20. – 10636.

79. Larisch, M.D. Simulation of auger displacement pile installation / M. D. Larisch, E. Nacke, M. Arnold, D. Williams, A. Scheuermann // *International Journal of Geotechnical Engineering*. – 2014. – V. 8 – №. 4. – P. 458–462.

80. Lee, W. Setup of Driven Piles in Layered Soil / W. Lee, D. Kim, R. Salgado, M. Zaheer // *Soils and Foundations*. – 2010. – V. 50 – №. 5 – P. 585–598.

81. Likins, G. Recent advances and proper use of PDI low strain pile integrity testing / G. Likins, F. Rausche // In: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> international conference on the application of stress-wave theory to piles*. – 2000. – P. 211–218.

82. Liu, J. Improvement of the fast simulation of gamma-gamma density well logging measurement / J. Liu, C. Yuan, S. Cai, G. Chen, H. Tian, Z. Liu, H. Zhoum // *Applied Radiation and Isotopes*. - 2021. – №167. – 109423.

83. Liu, J.L. An improved algorithm for pile damage localization based on complex continuous wavelet transform / J.L. Liu, C.X. Lin, X.J. Ye, W.T. Zheng, Y.P. Luo // *Smart Structures and Systems*. – 2021. – V. 27. – №3. – P.493–506.

84. Loseva, E. Identifying small defects in cast-in-place piles using low strain integrity testing / **E. Loseva**, I. Lozovsky, R. Zhostkov // *Indian Geotechnical Journal*. – 2022. –52. – P. 270–279.

85. Loseva, E. Specific features of the construction and quality control of pile foundations in engineering and geological conditions of Saint Petersburg / **E. Loseva**, A. Osokin, D. Mironov, I. Dyakonov // *Architecture and engineering*. – 2020. – 5(2). P. 38–45.

86. Loseva, E. Wavelet Analysis for Evaluating the Length of Precast Spliced Piles Using Low Strain Integrity Testing / **E. Loseva**, I. Lozovsky, R. Zhostkov, V. Syasko // *Applied Sciences*. – 2022. – 12, 10901. – 11 p.

87. Loseva, E.S. Features of underground space formation at the base of high-rise buildings / **E.S. Loseva**, A.I. Osokin, A.I. Kopteva // *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*. – 2020. –775(1):012025. – 10 p.

88. Lozovsky, I.N. Numerical Simulation of Ultrasonic Pile Integrity Testing / I. N. Lozovsky, R. A. Zhostkov, A. A. Churkin // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2020. – V.56. – №1. – P. 1-11.

89. NF P 94-160-1. Auscultation d'un element de foundation, partie 1: Methode par Transparence // Paris: AFNOR, 2000.

90. Ni, S.H. Applicability of complex wavelet transform to evaluate the integrity of commonly used pile types / S.H. Ni, J.L. Li, Y.Z. Yang, Y.Y. Lai // *Journal of GeoEngineering*. – 2019. – V.14. – №1. – P. 21–30.

91. Ni, S.H. Continuous wavelet transform technique for low-strain integrity testing of deep drilled shafts / S.H. Ni, W.M. Isenhower, Y.H. Huang // *Journal of GeoEngineering*. – 2012. – V.7. – P.97–105.

92. Ni, S.H. Evaluation of pile defects using complex continuous wavelet transform analysis / S.H. Ni, Y.Z. Yang, P.H. Tsai, W.H. Chou // *NDT and E International*. – 2017. – V.87. – P. 50–59.
93. Niederleithinger, E. Improved Parallel Seismic Technique for Foundation Assessment / E. Niederleithinger. – Conference: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. Extended Abstracts, 2005. – 1388.
94. O'Neill Construction Practices and Defects in Drilled Shafts / O'Neill, W. Michael // *Transportation Research Record* 1331. – 1991. – P. 6-14.
95. Palm, M. Single-hole sonic logging. A study of possibilities and limitations of detecting flaw in piles: Master of Science Thesis / Martin Palm. - Stockholm, 2012. – 86 p.
96. Pucker, T. Numerical simulation of the installation process of full displacement piles / T. Pucker, J. Grabe // *Computers and Geotechnics*. – 2012. – V. 45. – P. 93–106.
97. Rad, S.H. Experimental and field studies on the behavior of drilled displacement piles / S.H. Rad, S. Ghareh, A. Eslami, N. Ganjian // *Innovative Infrastructure Solutions*. – V.6. – №. 4.
98. Raushe, F. Comparison of pulse echo and transient response pile integrity test methods. Integrity testing of foundations / F. Raushe, S. Ren-Kung, G. Likins // *Transportation Research Board*. – 1991. – P. 21–27.
99. Rimoy, S. Stability and load-displacement behaviour of axially cyclic loaded displacement piles in sands / S. Rimoy, M. Silva, R.J. Jardine // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2022. – V.59. – №8.
100. Stojić, D. Experimental and numerical research on damage localization in plate-like concrete structures using hybrid approach. / D. Stojić, T. Nestorović, N. Marković, M. Marjanović // *Structural Control and Health Monitoring*. – 2018. – 25. – e2214.
101. Tomlinson, M.J. Design and construction practice. Fifth edition / M.J. Tomlinson, J. Pile Woodward. – CRC Press, UK. – 2007. – 566 p.
102. Vasilyeva, N.V. Automated digitization of radial charts. / N.V. Vasilyeva, A.V. Boikov, O.O. Erokhina, A.Y. Trifonov // *Journal of Mining Institute*. – 2021. – 247. – P. 82–87.

103. Watson, J.N. The de-noising of sonic echo test data through wavelet transform reconstruction / J.N. Watson, P.S. Addison, A. Sibbald // *Shock and Vibration*. – 1999. – V.6. – P. 267-272.
104. Wightman, W.E. Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems / W.E. Wightman, F. Jalinoos, P. Sirles, K. Hanna. – Federal Highway Administration, 2004. – 744 p.
105. Zhang, L.M. Level of Construction Control and Safety of Driven Piles / L.M. Zhang, D.Q. Li, W.H. Tang // *Soils and Foundations*. – 2006. – V. 46 – №. 4 – P. 415–425.
106. Zhen, T. Modeling of the attenuation of stress waves in concrete based on the Rayleigh damping model using time-reversal and PZT transducers / T. Zhen, H. Linsheng, G. Weihang, L. Hongnan, S. Gangbing // *Smart Materials and Structures*. – 2017. – V. 26. – № 10. – 105030.
107. Zhu, D. Laboratory Model Study on the Pile-Forming Mechanisms and Bearing Deformation Characteristics of CFA Piles / D. Zhu, Y. Li, L. Zheng, P. Fang, X. Xie // *Advances in Civil Engineering*. – 2021. – V.2021. – P. 1–10.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### АКТ О ВНЕДРЕНИИ



Общество с ограниченной ответственностью «ГЕОСТРОЙ»  
 191180, Санкт-Петербург, Загородный проспект, д. 27/21,  
 литер А, помещение 25-Н, комната №13  
 ИНН 7840068776, КПП 784001001, ОГРН 1177847257389  
 р/с 40702810003000020522 в филиале «Северная столица»  
 АО «Райффайзенбанк»

Утверждаю

Генеральный директор ООО «Геострой»  
 Е.В. Айдамирова



Дата «09» января 2023 г.

#### АКТ

#### о внедрении результатов кандидатской диссертации Лосевой Елизаветы Сергеевны

по научной специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»

Комиссия в составе:

Председатель Е.В. Айдамирова;

Члены комиссии:

От ООО «Геострой»:

Главный геотехник-А.И. Осокин;

Заместитель директора по производству-Я.Э. Тычинин.

От ФГБОУ ВО «Горный университет»:

Заведующий кафедрой метрологии, приборостроения и управления качеством-К.В. Гоголинский;

Заместитель декана по научной работе механико-машиностроительного факультета-А.Д. Халимоненко.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Повышение достоверности сейсмоакустического контроля свайных фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в неразрушающем контроле фундаментов зданий и сооружений деятельности ООО «Геострой» в виде методики контроля сплошности и оценки длины свайных оснований.

Использование указанных результатов позволяет повысить достоверность данных при обследовании свайных оснований.

Результаты внедрялись при выполнении НИР и ОКР по темам:

1. Проведение исследований сплошности буронабивных свай, устраиваемых по технологии вытеснения DDS в слабых водонасыщенных грунтах.
2. Исследование сплошности свай, устраиваемых по технологии непрерывного полого шнека (НПШ; CFA) при выполнении свайных фундаментов в водонасыщенных грунтах.
3. Изучение возможности определения прочностных свойств железобетонных конструкций, устраиваемых в грунтах при использовании неразрушающих методов контроля.

**Председатель комиссии**

Генеральный директор  
ООО «Геострой»



Е.В. Айдамирова

**Члены комиссии:**

Главный геотехник ООО «Геострой»

А.И. Осокин

Заместитель директора по производству  
ООО «Геострой»

Я.Э. Тычинин

Заведующий кафедрой  
метрологии, приборостроения и  
управления качеством

К.В. Гоголинский

Заместитель декана по научной работе  
механико-машиностроительного  
факультета

А.Д. Халимоненко

ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023610021

**Программа для выявления дефектов буровых и  
буронабивных свай на основе данных, полученных  
сейсмоакустическим методом, в полевых условиях**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Котелева Наталья Ивановна (RU), Лосева  
Елизавета Сергеевна (RU), Сясько Владимир  
Александрович (RU)*

Заявка № 2022684877

Дата поступления **15 декабря 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **09 января 2023 г.**



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Ю.С. Зубов*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2023610021**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
**ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства): <b>2023610021</b> Дата регистрации: <b>09.01.2023</b> Номер и дата поступления заявки: <b>2022684877 15.12.2022</b> Дата публикации и номер бюллетеня: <b>10.01.2023 Бюл. № 1</b> Контактные реквизиты: <b>нет</b>	Автор(ы): <b>Котелева Наталья Ивановна (RU),          Лосева Елизавета Сергеевна (RU),          Сясько Владимир Александрович (RU)</b> Правообладатель(и): <b>федеральное государственное бюджетное          образовательное учреждение высшего          образования «Санкт-Петербургский горный          университет» (RU)</b>
---	--

Название программы для ЭВМ:  
**Программа для выявления дефектов буровых и буронабивных свай на основе данных, полученных сейсмоакустическим методом, в полевых условиях**

**Реферат:**

Программа может быть использована для оценки состояния и определения типов дефектов буровых и буронабивных свай в полевых условиях, то есть непосредственно на объектах при проведении строительных работ, а также в учебном процессе для студентов направления подготовки 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств в рамках дисциплины «Интеллектуальные системы». Разработан программный алгоритм определения дефектов свай в режиме реального времени на основе сигнала, полученного сейсмоакустическим методом. По данному сигналу выявляется вид дефекта сваи. Обеспечивается выполнение следующих функций: предварительная обработка данных для построения ИНС-классификатора тремя способами, обучение ИНС-классификатора, определение дефектов свай с помощью ИНС классификатора.

**Язык программирования:** С  
**Объем программы для ЭВМ:** 10 МБ