


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

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2023

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Сясько Владимир Александрович

Официальные оппоненты:

Аббакумов Константин Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра электроакустики и ультразвуковой техники, профессор;

Кинжагулов Игорь Юрьевич

кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», факультет систем управления и робототехники, преподаватель;

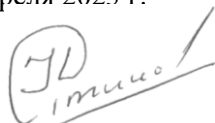
Ведущая организация – общество с ограниченной ответственностью «Акустические контрольные системы», г. Москва.

Защита диссертации состоится **22 июня 2023 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 21 апреля 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



УСТИНОВ
Денис Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, тексотропных 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 грунтовой массе 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 сейсмоакустический 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 сваи, 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 – мультимодальное ударное возбуждение акустических колебаний в теле сваи 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, повы-

шающей 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 свай-

ных 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.

5. По результатам полевых испытаний разработана программа ЭВМ для выявления дефектов буровых и буронабивных свай.

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 про-

водилась при помощи аттестованного и поверенного специализированного оборудования Спектр-4.0, предназначенного для оценки длины и сплошности свай.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Мультимодальное 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 вейвлетпреобразованием 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, экспериментальными исследованиями, подтверждающими теоретические расчеты, а также сравнением с результатами других исследователей.

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 (CEQCL) (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 фундаментов 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 исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, 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 (далее – Перечень ВАК), 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 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ инженерно-геологического разреза Санкт-Петербурга, а также техно-

логий, традиционно применяемых при возведении свайных фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах.

Выявлены наиболее часто встречающиеся дефекты, возникающие при изготовлении свай в слабых водонасыщенных грунтах, такие как утоньшения, включения грунта, размывы и т.д.

Проанализировано изменение физико-механических характеристик бетонной смеси при твердении в грунте. Показано влияние слабых водонасыщенных грунтов на формирование свай в грунтовом массиве и возникновение дефектов.

Проведен анализ методов, используемых для контроля длины и сплошности тела свай. Выявлен ряд ограничений наиболее часто используемого сейсмоакустического метода.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе представлены теоретические основы сейсмоакустического метода. С целью повышения его информативности и достоверности проведена серия численного моделирования процессов распространения упругих акустических колебаний для моделей железобетонных свайных фундаментов с искусственными дефектами. На основании полученных результатов сделаны выводы о невозможности выявления большого количества видов дефектов при помощи стандартной методики. Для повышения достоверности интерпретации полученных данных предложен проект методики по сейсмоакустическому контролю свайных фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах на основе частотно-временного представления полученного сигнала с анализом фазы.

В конце второй главы сформулированы выводы и даны рекомендации по использованию полученных результатов.

В третьей главе приведены результаты разработки испытательных образцов и испытательного полигона для ве-

рификации проекта методики. Изложены результаты исследований проекта методики на испытательных образцах с искусственными дефектами, подтвердившие основные результаты моделирования.

В четвертой главе приведены основные результаты применения разработанной методики сейсмоакустического контроля свайных фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах с использованием частотно-временного представления полученного сигнала с анализом фазы и классификаторов на основе искусственных нейронных сетей. Показано, что применение методики позволяет локализовать искусственные дефекты в испытательных образцах, тем самым повысить достоверность интерпретации данных, полученных при использовании сейсмоакустического метода.

В пятой главе выполнена валидация разработанной методики на реальных образцах в условиях эксплуатации свайных фундаментов и сформулированы предложения по корректировке нормативной документации.

В заключении представлены обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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.

Для оценки длины и локализации дефектов в сваях наиболее распространенным методом является сейсмоакустический метод, основанный на анализе распространения акустических волн в теле сваи (Рисунок 1). Метод соответствует стандарту ASTM D5882 и другим международным нормам. При испытаниях (неразрушающем контроле) упругие волны возбуждаются ударом молотка по оголовку сваи и распространяются вниз вдоль тела сваи, многократно отражаясь от границ участков с отличающимися значениями акустического импеданса, которые соответствуют пяте сваи, стыкам между секциями составных свай и имеющимся дефектам.

Ввиду того, что естественные дефекты могут иметь различную форму и акустические характеристики, точная физическая реализация возникающих естественных дефектов (Рисунок 2) вызывает технические и технологические трудности, поэтому при проведении моделирования, экспериментов и исследований реальные дефекты заменяются искусственными.

В процессе контроля свай сейсмоакустическим методом реализуется мультисоставное ударное возбуждение упругих волн. Для повышения выявляемости дефектов используются входные импульсы различной длительности. Более короткие импульсы соответствуют ударам легкими металлическими молотками, более длинные - тяжелым киянкам.

Для моделирования процессов распространения колебаний в теле сваи с искусственными дефектами использовалось программное обеспечение Comsol Multiphysics при обоснованных граничных условиях, соответствующих условиям применения. Источник акустических колебаний представляет собой область диаметром 30 мм в оголовке сваи на ее оси. Граничное условие в области источника задавалось в виде вертикально действующей силы, изменяющейся по закону (1):

$$F = -Ae^{-\left(2\pi\frac{(t-0.5T)}{T}\right)^2} \cdot \left\{ \begin{array}{ll} \left(0.5 - 0.5\cos\left(2\pi\frac{t}{T}\right)\right), & \text{if } t < T \\ 0, & \text{if } t \geq T \end{array} \right\} (1),$$

где A – максимальная величина действующей силы,
 T – длительность импульса.

Предварительные расчеты проводились для четырех типов искусственных дефектов в сваях, изготавливаемых в грунте. Исследуемые модели представлены на Рисунке 3. Высота (толщина) каждого искусственного дефекта составляла 100 мм, диаметр сваи 450 мм, а общая длина сваи 3 м.

Было проведено численное моделирование процессов распространения упругих колебаний для всех моделей при длительности импульса входной силы 0.5, 0.75, 1 и 1.2 мс, результаты которого показаны на Рисунке 5. Хотя каждый синтетический сигнал демонстрирует четкое отражение от пяты сваи, разрешение при отличающихся длительностях импульсов источника значительно различается. Низкочастотные сигналы нечувствительны к искусственным дефектам в теле сваи, в то время как высокочастотное возбуждение приводят к заметным отражениям от искусственных дефектов в случае покрытия дефектом 30% поперечного сечения сваи (Модель 2, Рисунок 5б). Дефекты размерами 150×300 мм (Модель 3, Рисунок 5в) и 150×150 мм (Модель 4 Рисунок 5г) 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.

Для повышения достоверности результатов интерпретации данных сейсмоакустического контроля предложено использовать инструменты вейвлет-преобразования, переводя-

щего анализируемый сигнал из временного в частотно-временное представление. Прямое непрерывное вейвлет-преобразование отображает рассматриваемый сигнал $f(t) \in L^2(R)$ в функцию двух переменных $a, b \in R, a > 0$ (2):

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (2)$$

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 предложено использовать комплексный вейвлет Морле (3):

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi B}} \exp \left(-\frac{t^2}{B} \right) \exp(i2\pi C t), \quad (3)$$

где параметр B – пропускная способность, параметр C – центральная частота.

Варьирование данных параметров, позволило настроить материнскую функцию для сигналов различного рода, а также регулировать частотно-временное разрешение вейвлет-преобразования.

Также использовалось главная особенность комплексного вейвлет-преобразования – наличие мнимой и вещественной части. Используя вещественную часть можно получить информацию только об амплитуде, в то время как мнимая часть дает информацию также и о фазе, что позволяет повысить точность интерпретации сигнала (4):

$$\phi(a, b) = \arctan \left(\frac{W_I(a, b)}{W_R(a, b)} \right) \quad (4),$$

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 наблюдается на амплитудном спектре, однако это изменение является малоинформативными. Одновременно с этим, при наличии аномалий в объекте контроля, происходят изменение фазы, которые отслеживаются на фазовом спектре. Анализируя момент изменения фазы, можно сделать вывод о сплошности конструкции, точно локализовать аномалию или же определить длину сваи.

Применение методики, основанной на комплексном вейвлет-преобразовании, для обработки сигналов монолитных железобетонных свай позволяет однозначно интерпретировать результаты контроля. В качестве примера на Рисунке 6 и Рисунке 7 приведены результаты применения методики к Модели 1 и Модели 2. 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. На фазовом спектре Модели 2 смена фазы происходит и на 0.75 мс, что соответствует месторасположению дефекта.

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.

Для верификации разработанного проекта методики был устроен опытный полигон, состоящий из испытательных образцов (монолитных железобетонных свай) с искусственными

дефектами (Рисунок 4). Для имитации дефекта «грунтовое включение» искусственные дефекты изготавливаются в виде вставок в форме прямоугольного параллелепипеда размерами 150×300×100 мм и 150×150×100 мм. Для имитации дефекта «размытие бетонной смеси» искусственный дефект изготавливается в форме цилиндрической вставки диаметром 250 мм и высотой 100 мм. Для каждого вида дефекта было изготовлено по три испытательных образца, а также один бездефектный испытательный образец. Всего было изготовлено десять испытательных образцов.

На Рисунке 8 и Рисунке 9 приведены результаты применения сейсмоакустического метода на испытательных образцах и последующая обработка сигналов с использованием комплексного вейвлет-преобразования, подтвердившая основные результаты моделирования.

Кроме, для интерпретации результатов и идентификации дефектов свай предложен метод кластерного анализа, так называемый ИНС-классификатор. Предложено использовать в качестве входного вектора ИНС-классификатора характерные точки спектра сигналов, а в качестве выходного-тип дефекта сваи. Результаты исследований позволили сделать вывод о том, что ИНС-классификатор может использоваться в качестве основного инструмента для автоматической интерпретации результатов испытания свай на сплошность, полученных сейсмоакустическим методом.

Также была проведена верификация разработанной методики на действующих объектах. Методика применялась к данным, полученным при обследовании буронабивных свай большой длины, при обследовании фундаментов существующих зданий с целью восстановления утраченной информации об их длине и при обследовании свай заводского изготовления с целью локализации стыка секций. Результаты контроля подтвердили обоснованность основных положений теоретических

и экспериментальных исследований, положенных в основу методики.

С учетом полученных результатов сформулированы рекомендации по корректировке нормативной документации, регламентирующей контроль свайных фундаментов в процессе их производства и эксплуатации, указанные в заключении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – 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 методик получения и обработки сигналов сейсмоакустического метода неразрушающего контроля.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Проведенный анализ особенностей грунтов Санкт-Петербурга и технологий изготовления свай в их среде позволил классифицировать дефекты в теле свай, 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 час-

точно-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, применяемых 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 слабых водонасыщенных грунтах и грунтах с аналогичными характеристиками.

6. С использованием испытательных и реальных образцов свай проведены экспериментальные исследования принципов и процессов контроля, обеспечивающих выявление дефектов и оценку длины свай 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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.

2. 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.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Loseva, E.S. Wavelet Analysis for Evaluating the Length of Precast Spliced Piles Using Low Strain Integrity Testing // Loseva E.S., Lozovsky I.N., Zhostkov R.A., Syasko V.A. // Applied Sciences. – 2022. – № 12. – P. 1-12. <https://doi.org/10.3390/app122110901>

4. Loseva, E.S. Identifying Small Defects in Cast-in-Place Piles Using Low Strain Integrity Testing/ Loseva E.S., Lozovsky I.N., Zhostkov R.A. // Indian Geotechnical Journal. – 2022. – № 52. - P. 270-279. <https://doi.org/10.1007/s40098-021-00583-y>

Патент:

5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023610021, Российская Федерация. Программа для выявления дефектов буровых и буронабивных свай на основе данных, полученных сейсмоакустическим методом, в полевых условиях: № 2023610021: заявл. 15.12.2022: опубл: 09.01.2023 / Котелева Н.И., Лосева Е.С., Сясько В.А.: заявитель Санкт-Петербургский горный университет. -1 с.

Сейсмоакустический метод контроля:

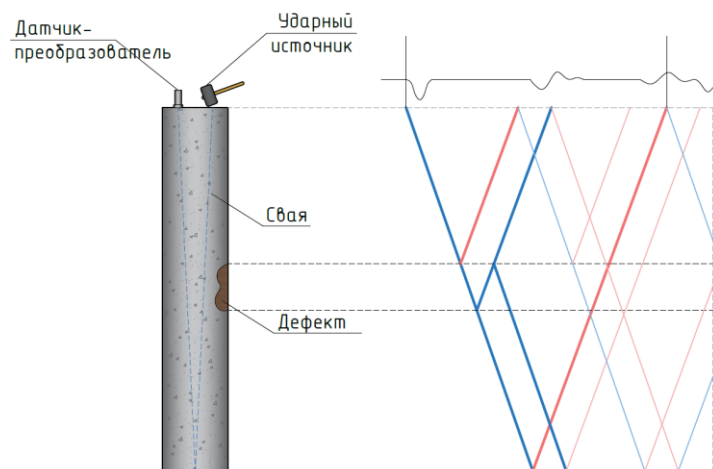


Рисунок 1 – Схема испытаний свай с использованием сейсмоакустического метода. Красными и синими линиями условно показаны траектории распространения волн.

Дефекты, возникающие при устройстве свай:



Рисунок 2 – Дефекты в сваях «размытие бетонной смеси» и «вывалы грунта»

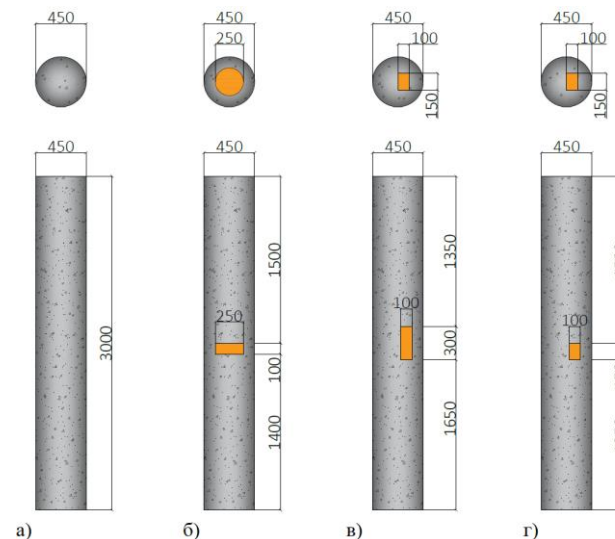


Рисунок 3 – Геометрические характеристики моделей монолитных железобетонных свай: а – бездефектная свая (Модель 1), б – с искусственным дефектом диаметром 250 мм и толщиной 100 мм (Модель 2), в – с искусственным дефектом 100x150x300 мм (Модель 3), г – с искусственным дефектом 100x150x150 мм (Модель 4)



Рисунок 4 – Искусственные дефекты

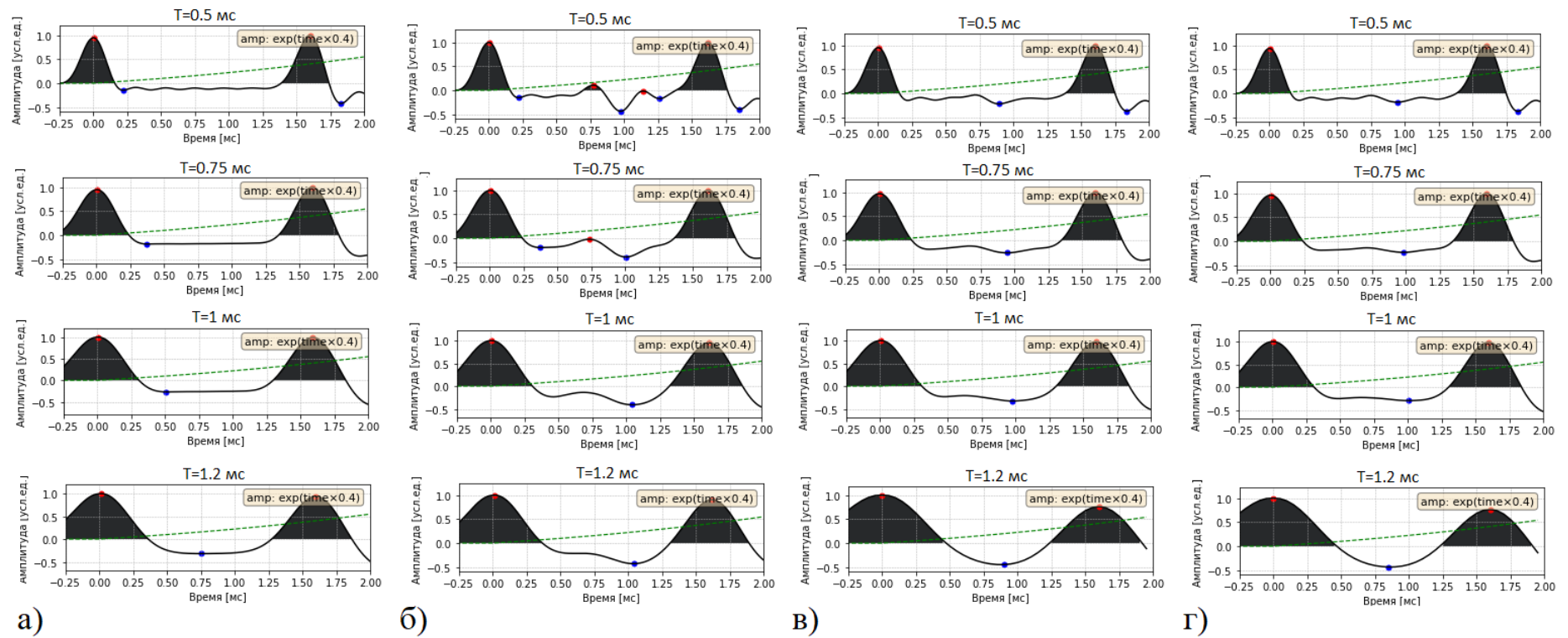


Рисунок 5 – Результаты численного моделирования процессов распространения упругих колебаний для моделей монолитных железобетонных свай с искусственными дефектами: а – бездефектная свая (Модель 1), б - с искусственным дефектом диаметром 250 мм и толщиной 100 мм (Модель 2), в - с искусственным дефектом 100x150x300 мм (Модель 3), г - с искусственным дефектом 100x150x150 мм (Модель 4)

Результаты применения комплексного вейвлет-преобразования к результатам численного моделирования:

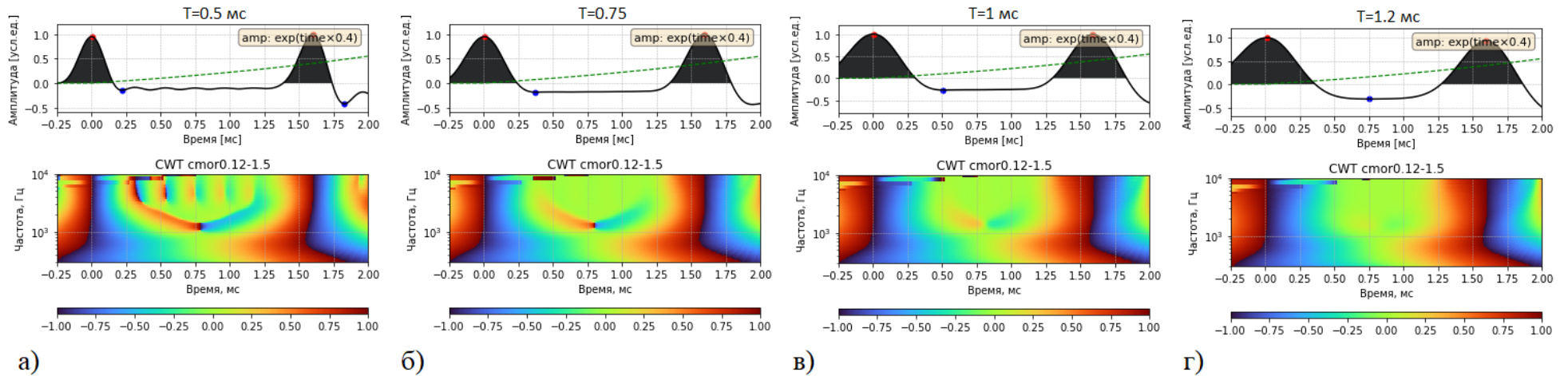


Рисунок 6 – Временные диаграммы и фазовые спектры для бездефектной сваи (Модель 1) с длительностью входного импульса: а) 0.5 мс; б) 0.75 мс; в) 1 мс; г) 1.2 мс

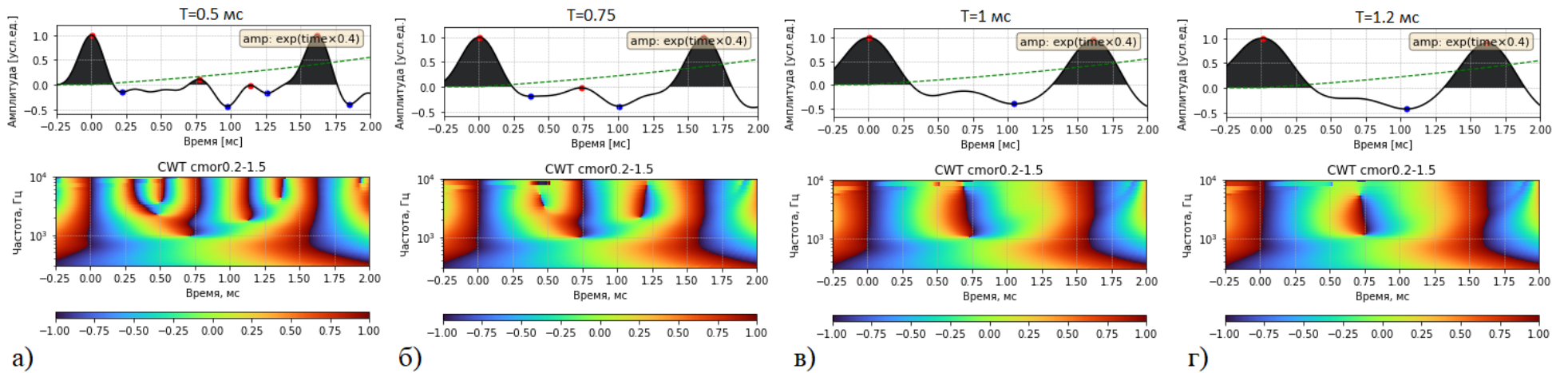


Рисунок 7 – Временные диаграммы и фазовые спектры для сваи с искусственным дефектом диаметром 250 мм и толщиной с 100 мм (Модель 2) при длительности входного импульса: а) 0.5 мс; б) 0.75 мс; в) 1 мс; г) 1.2 мс

Результаты применения сейсмоакустического метода к испытательным образцам и последующая обработка сигналов при помощи комплексного вейвлет-преобразования:

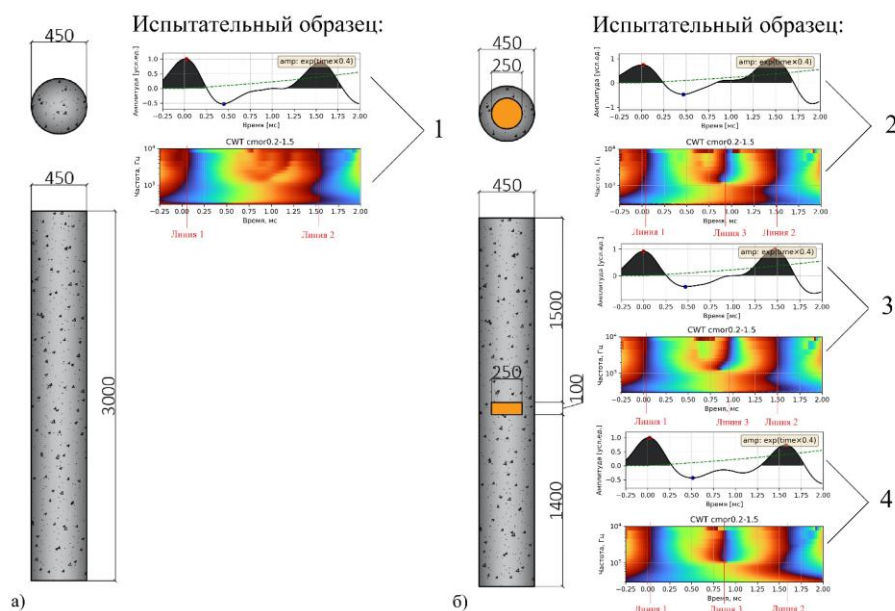


Рисунок 8 – Результаты применения комплексного вейвлет-преобразования к данным (сигналам), полученным при испытании: а) бездефектного испытательного образца 1; б) испытательных образцов 2-4 с искусственным дефектом размерами

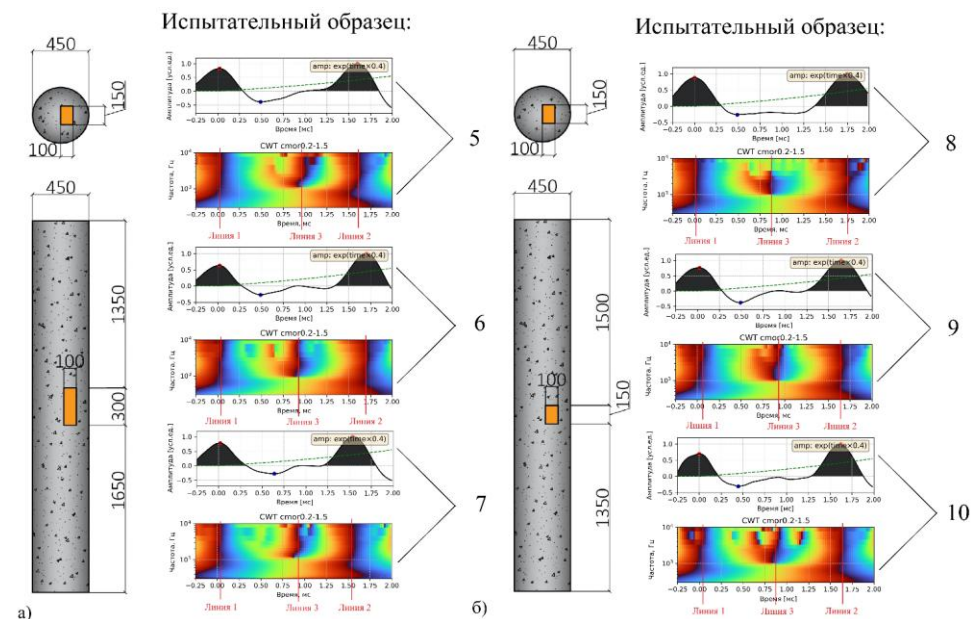


Рисунок 9 – Результаты применения комплексного вейвлет-преобразования к данным (сигналам), полученным при испытании: а) испытательных образцов 5-7 с дефектом, имитирующим естественный дефект «включение грунта» размерами 100×150×300; б) испытательных образцов 8-10 с дефектом, имитирующим естественный дефект «включение грунта» размерами 100×150×150