

Работа выполнена в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Владов Михаил Львович

Официальные оппоненты: Алешин Александр Степанович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, зав. лабораторией

Аникин Олег Петрович, кандидат технических наук, Московский государственный строительный университет, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: НИИ оснований и подземных сооружений имени Н.М. Герсеванова

Защита диссертации состоится 22 мая 2013 года в 14 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета Д 501.001.64 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д.1, ГЗ МГУ, зона «А», геологический факультет, аудитория 308.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале отдела диссертаций Фундаментальной библиотеки (Ломоносовский проспект, 27, сектор А, 8 этаж, к. 812)

Автореферат разослан ____ апреля 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Никулин Борис Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований.

В последние годы наблюдаются устойчивые темпы роста промышленного и гражданского строительства, особенно в крупных городах. Строительство часто ведется во все более сложных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях. Это способствует возникновению новых технологий производства работ и методов диагностики. Применение методов неразрушающего контроля позволяет оперативно получать информацию о различных характеристиках объекта без нарушения процесса его эксплуатации. Особенно это актуально для скрытых работ, поскольку доступ к объекту исследования практически закрыт, а его вскрытие может повлечь нежелательные последствия для работы всего сооружения.

При обследовании свай наиболее производительным и простым в применении является поверхностный акустический метод, в зарубежной литературе известный как SIT (Sonic Integrity Testing). Метод SIT состоит в ударном возбуждении упругой волны акустического диапазона частот в обследуемой свае и регистрации эхо-сигналов. Следует различать два случая применения метода: 1) если известна стержневая скорость продольной волны в материале, то можно определить длину сваи и 2) если известна длина сваи, то можно определить скорость и, следовательно, судить о прочностных характеристиках материала сваи.

В процессе производственной деятельности и систематического изучения материалов, получаемых по методу SIT, стало ясно, что рассматривать сваю отдельно от вмещающего массива и пренебрегать его существованием некорректно. Например, было отмечено, что в ряде случаев характер отражений в наблюдаемом поле коррелируется с положением границ в геологическом разрезе. Вмещающий массив всегда

оказывает большее или меньшее влияние на распространение акустических волн в сваях. Это влияние определяется, в основном, соотношением спектрального состава колебаний и размеров сваи. При этом не всегда понятно, какие из особенностей зарегистрированного волнового поля относятся к самой свае, а какие к влиянию вмещающего массива. Поэтому крайне важным является следующий вопрос: при каких условиях мы можем быть уверены, что регистрируемое волновое поле зависит исключительно от внутреннего строения сваи, а при каких условиях к этому добавляется влияние вмещающего грунта. Это один из вопросов, которые исследуются в настоящей работе.

Управление акустическим полем (использование различных источников для достижения требуемого соотношения спектрального диапазона возбуждаемых колебаний и геометрических параметров свай) с целью выделения эффектов, обусловленных строением сваи или вмещающим массивом, открывает возможности для решения целого ряда дополнительных задач. К этим задачам относятся: определение заглубления сваи в опорный горизонт, отслеживание уровня грунтовых вод в котловане, определение уровня заполнения внутреннего пространства в металлических сваях-трубах, определение уровня насыпных грунтов и др.

Цель работы.

Усовершенствовать интерпретационную модель сваи, рассматривая ее в рамках комплексной литотехнической системы свая-грунт, путем учета влияния вмещающей среды.

Основные задачи исследований:

1. Изучение в лабораторных условиях особенностей излучения и отражения волн, распространяющихся в стержнях, в случае невыполнения условий длинноволнового предела.

2. Проведение натурных экспериментов на сваях для оценки влияния вмещающего массива грунтов на результаты измерений акустическим методом и определения границ применимости длинноволнового предела.

3. Проведение натурных экспериментов по управлению волновым полем для разработки способа разделения волновых полей, отраженных от неоднородностей внутри сваи и во вмещающем массиве.

4. Составление методических рекомендаций по проведению работ с помощью многочастотной модификации поверхностного акустического метода.

5. Разработка специального программного обеспечения для неразрушающего контроля свай, реализующего принципы управления акустическим полем.

Основные защищаемые положения:

1. Определены границы применимости модели длинного тонкого стержня для диагностики железобетонных и стальных свай методом SIT.

2. Изучен характер влияния вмещающего массива при невыполнении условий длинноволнового предела.

3. Расширен класс моделей, используемых при интерпретации материалов поверхностного акустического метода диагностики свай. Предложен способ разделения отражений от внутренних дефектов свай и от неоднородностей во вмещающей среде, основанный на изучении спектральных характеристик акустического поля.

4. Разработаны и опробованы методические рекомендации по применению многочастотной модификации поверхностного акустического метода для диагностики свай.

5. Разработано и внедрено программное обеспечение для обработки и интерпретации данных акустического метода диагностики свай, реализующее принципы управления акустическим полем.

Научная новизна:

1. Расширены возможности акустического метода обследования свай путем изучения в лабораторных и натуральных условиях характера излучения и взаимодействия сваи с вмещающей средой.

2. Впервые для реальных свай на основе изучения спектральных характеристик регистрируемых на сваях акустических записей определены границы применимости длинноволнового предела и предложен способ определения типа физической модели сваи применительно к конкретным условиям наблюдений.

3. Впервые для поверхностного акустического метода предложена методика, реализующая выбор спектрального состава возбуждаемых колебаний и позволяющая решать целый ряд дополнительных задач, кроме определения длины и сплошности сваи (например, определение заглубления сваи в опорный горизонт, отслеживание уровня грунтовых вод и др.).

Практическая значимость.

В рамках настоящей работы разработана методика применения принципов управления полем для акустического метода, которая опробована и применяется при обследовании свайных оснований строящихся и реконструируемых сооружений, позволяющая решать более широкий круг задач, чем классический метод SIT. Программное обеспечение, написанное в соответствии с данной методикой, применяется в ряде изыскательских организаций. Необходимость разработки программного обеспечения обусловлена усложнением задач, стоящих перед изыскателями, и отсутствием специализированной компьютерной программы для обработки и интерпретации данных акустического метода диагностики свай, получаемых с помощью прибора ИДС-1. Программа принята ООО «Логис» для включения в комплект поставки ИДС-1.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Апробация работы.

Основные положения работы докладывались на следующих конференциях: Международная молодежная научная конференция «Математическая физика и ее приложения» (МФП-2012) в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы», Пятигорск, 2012; V Международная заочная научно-практическая конференция молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники», Уфа, 2012; XX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2013», Москва, 2013.

Объем и структура работы.

Работа состоит из введения, 4 глав и заключения. Содержит 127 страниц машинописного текста, 71 рисунок, 2 таблицы и библиографический список использованных литературных источников из 73 наименований.

Благодарности.

Автор выражает глубокую признательность М.Л. Владову за руководство данной работой и ценные рекомендации по ходу ее выполнения. Автор благодарен кандидату физико-математических наук В.В. Капустину за идею, которая легла в основу настоящей диссертации, и возможность ее реализации на практике.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, определена цель и сформулированы основные задачи.

В **первой главе** рассмотрено современное состояние задачи обследования свай методами неразрушающего контроля. Обозначено, какое место данные методы занимают в комплексе инженерных методов контроля, использующихся при обследовании фундаментных конструкций на основе свайных технологий.

Дана характеристика объекта исследований (свайных фундаментов). Классификация свай осуществлена на основе следующих признаков: 1) по способу заглубления в грунт; 2) по условиям взаимодействия с грунтом; 3) по характеру изменения свойств (сечение и свойства материала) вдоль оси сваи.

Особенности применения различных по природе исследуемого поля геофизических методов для диагностики свай определяются поставленной задачей и типом обследуемой конструкции:

1) Поверхностный акустический метод. Данный метод является наиболее производительным и простым в применении. Его целесообразно применять в тех случаях, когда есть свободный доступ к оголовку сваи и необходимо провести оперативную диагностику достаточно большого количества свай.

2) Скважинные акустические методы. Поверхностные методы неприменимы для свай, изготавливаемых методом струйной цементации (из-за непостоянства скорости распространения продольной волны вдоль сваи), свай, созданных по разрядно-импульсной технологии (из-за непостоянства сечения), а также для других фундаментных конструкций, доступ к которым с поверхности закрыт. Для неразрушающего контроля

подобных объектов могут использоваться методы, основанные на наблюдении в скважине, расположенной внутри объекта или рядом с ним во вмещающем грунте.

3) Методы, основанные не на акустической природе возбуждаемого поля. В группе данных методов выделяются: электромагнитные методы (возможно применение как в поверхностном, так и в скважинном варианте) и электроразведка на постоянном токе.

Интерпретационной моделью сваи при работе акустическим методом является длинный тонкий стержень. Это значит, что выполняются следующие условия: 1) $a \ll \lambda$ (условие тонкого стержня); 2) $a \ll L$ (условие длинного стержня по соотношению его радиуса и длины); 3) $\lambda \ll L$ (условие длинного стержня по соотношению длины волны и длины стержня). Данные условия следуют из теоретических соображений и для практического применения нуждаются в более точной количественной оценке. Основной задачей, решаемой в настоящей работе, является поиск критерия, по которому можно определять физическую модель сваи применительно к конкретным условиям наблюдений.

В тонком стержне возможно существование трех типов колебаний: продольные, крутильные и изгибные. При продольных колебаниях элемент стержня удлиняется, и нет поперечных перемещений оси стержня. При крутильных колебаниях каждое поперечное сечение, оставаясь в своей плоскости, поворачивается относительно центра, а ось стержня остается невозмущенной. При изгибных колебаниях элементы стержня движутся в поперечном направлении. Метод SIT основан на изучении характера распространения продольных волн в сваях при выполнении условий длинноволнового предела. Тогда влияние вмещающего сваю массива проявляется только в затухании волны, бегущей в стержне, за счет сил трения.

В случае, когда условие тонкого стержня (длинноволновой предел) в точности не выполняется, имеет место эффект Пуассона: при продольном

возбуждении стержня возникают поперечные деформации. Тогда появляется необходимость вводить поправки, уточняющие уравнения элементарной теории и учитывающие поперечные колебания стержня, или решать уравнения движения, получая точные решения. В данном случае вмещающий грунт оказывает существенное влияние на характер волнового движения, что проявляется в излучении энергии волны, распространяющейся в стержне, и ее отражении от контрастных границ и неоднородностей вблизи сваи.

Поверхностный акустический метод применяется для диагностики свай уже более 40 лет. За это время накоплен обширный опыт обследования свай. В самом простом случае (свая без дефектов и нарушений сплошности) на данных метода SIT, полученных в условиях длинноволнового предела, наблюдается только сигнал прямого прохождения и импульс, отраженный от конца сваи (рис. 1-а).

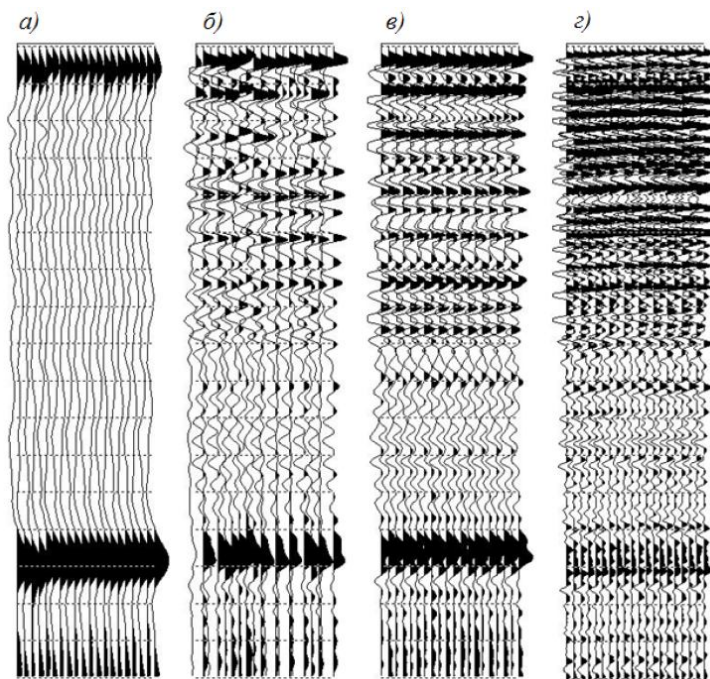


Рис. 1. Изменение акустического поля в буронабивной свае (длина 28,0 м, диаметр 1,0 м) при увеличении центральной частоты возбуждаемого сигнала. Источники сигнала: а – резиновый молоток ($\lambda=12$ м; $a/\lambda=0,08$); б – металлический молоток весом 600 г ($\lambda=7,3$ м; $a/\lambda=0,14$);

в – металлический молоток весом 200 г ($\lambda=6,4$ м; $a/\lambda=0,16$);

г – металлический молоток весом 100 г ($\lambda=5,6$ м; $a/\lambda=0,18$)

В этом случае решаются две задачи: определение длины сваи (полной или до нарушения сплошности) при известной прочности и определение прочности при известной длине. В случае если условия тонкого стержня в точности не выполняются и влиянием вмещающего массива пренебречь нельзя, записи сильно усложняются (рис. 1-б,в,г). Импульсы, появившиеся до вступления отражения от конца сваи, могут соответствовать контрастным геологическим границам и неоднородностям в теле сваи. При уменьшении веса источника (увеличении частоты возбуждаемого импульса) в волновом поле проявляются все более тонкие особенности.

Во **второй** главе приводятся результаты исследования колебаний в системе стержень – вмещающая среда в лабораторных условиях. О вопросах распространения волн в стержнях написано множество работ, но лишь небольшая их часть посвящена экспериментальному изучению данного вопроса. В основном экспериментальные исследования посвящены определению механических характеристик материала путем наблюдения за особенностями распространения волн на образцах, находящихся в воздухе, и не затрагивают круг вопросов, связанных с взаимодействием стержня и вмещающей среды. Поэтому в рамках настоящей работы было проведено исследование явлений, наблюдающихся при обследовании свай, на модельных стержнях в лабораторных условиях. При этом изучались вопросы, наиболее важные для практического применения акустического метода обследования свай и расширения круга решаемых им задач. Основной задачей лабораторных экспериментов являлось изучение особенностей излучения и отражения волн, распространяющихся в стержнях, в случае невыполнения условий длинноволнового предела. Для решения данной задачи было проведено моделирование в лабораторных условиях различных вариантов

соотношений спектра возбуждаемых колебаний, диаметра и длины стержня на примере металлических и эбонитовых стержней. Целью лабораторных экспериментов не было полное физическое моделирование сваи, находящейся в грунте, с последующим масштабным переносом результатов в натурные условия. На примере ультразвуковых измерений изучены следующие позиции: 1) наличие излучения энергии волнового движения, распространяющегося в стержне, во вмещающую среду при невыполнении условий длинноволнового предела; 2) отражение волнового движения, распространяющегося в стержне, от границ во вмещающей среде при невыполнении условий длинноволнового предела.

Исследование распространения упругих волн в стержнях проводилось ультразвуковым импульсным методом. Для возбуждения и регистрации колебаний использовался ультразвуковой дефектоскоп УК-10ПМС с ударным возбуждением, пьезоэлектрические датчики поршневого типа и пьезоэлектрический сферический датчик. В качестве вмещающей среды была выбрана вода, поскольку в данном случае минимальны силы вязкого трения на границе вода-стержень.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Продольная волна, распространяясь в стержне, взаимодействует с границами во вмещающей стержень среде. При этом происходит образование проходящих, обменных и отраженных волн, распространяющихся в стержне и вдоль него (рис. 2, 3).

2. Взаимодействие продольной волны, распространяющейся в стержне, с границами во вмещающем массиве зависит от соотношения спектрального состава колебаний и размеров стержня.

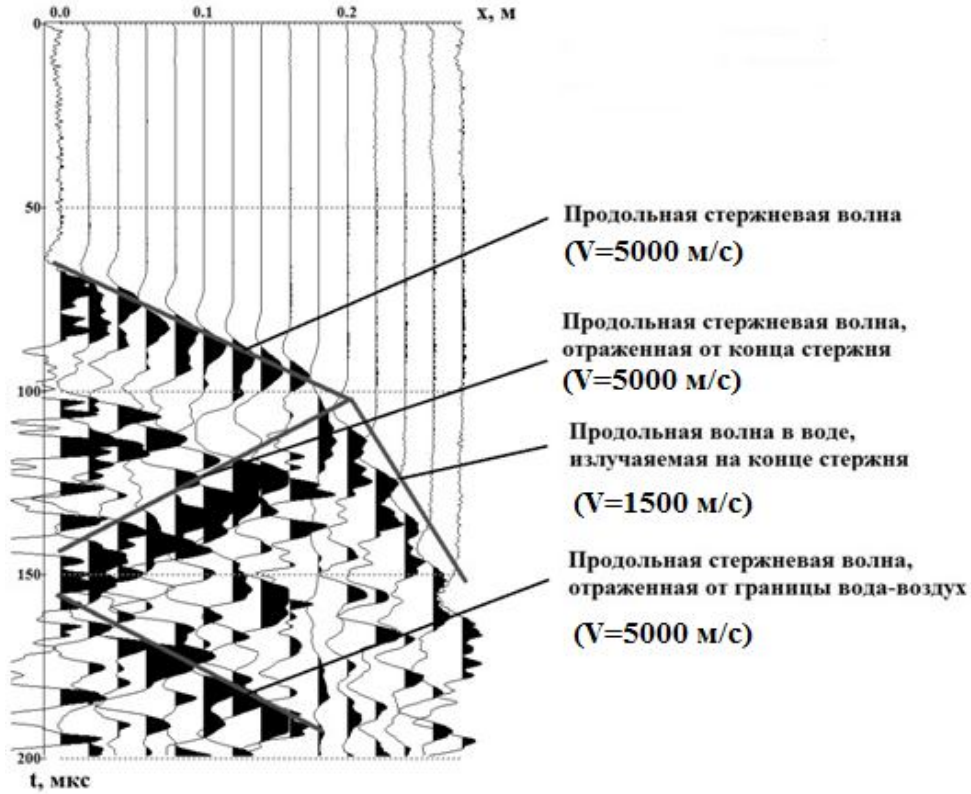


Рис. 2. Волновая картина, зарегистрированная при перемещении датчика вдоль металлического стержня в воде

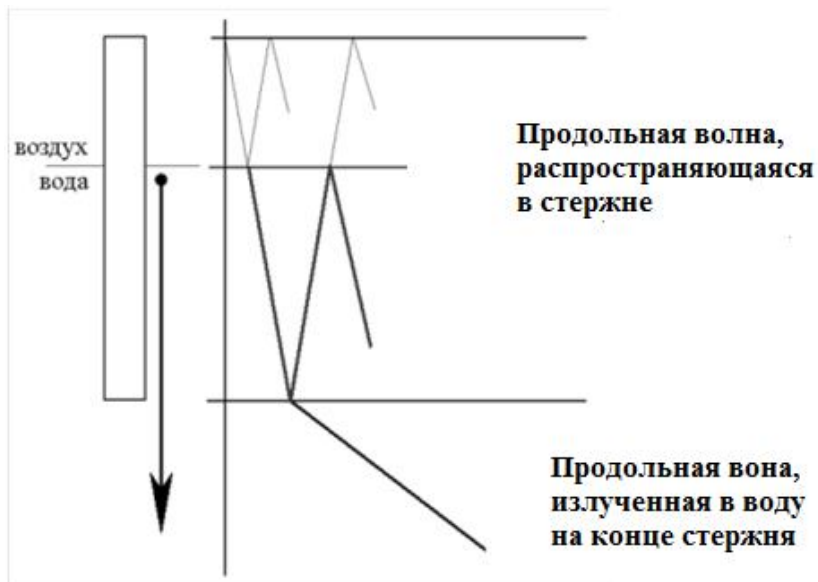


Рис. 3. Лучевая схема распространения волн в стержне, соответствующая волновой картине, представленной на рис. 2. Стрелкой показан профиль наблюдений

Третья глава. Автором и его коллегами были проведены многочисленные натурные измерения на сваях. Основной целью исследований было изучение записей акустических колебаний свай с позиции управления полем для оценки возможности разделения эффектов, связанных с распространением плоской волны (сама свая) и с влиянием вмещающего грунта, и расширения круга задач, решаемых акустическим методом (рис. 4).

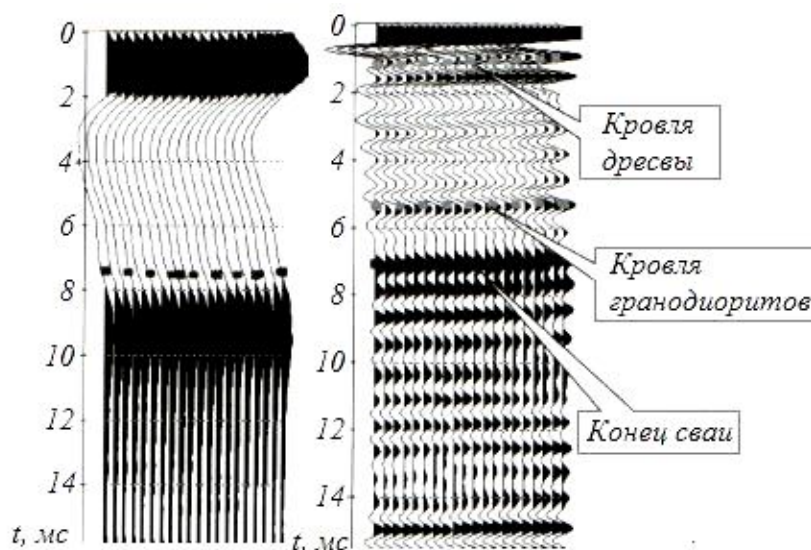


Рис. 4. Пример управления полем для определения заглубления сваи в опорный горизонт. Слева – запись, полученная при выполнении условий длинноволнового предела, справа – при невыполнении условий длинноволнового предела

По результатам проведенных натурных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Управление акустическим полем позволяет выполнять или не выполнять условия длинноволнового предела. Это дает возможность изучать только саму сваю или дополнительно вмещающую среду.

2. Чтобы различить отражения, связанные с самой свайей и с вмещающим грунтом, при каждом измерении необходим контроль спектра

колебаний, поскольку выполнение или невыполнение условий длинноволнового предела зависит от того, с каким частотным составом удалось возбудить колебания в данном измерении.

3. В случае невыполнения условий длинноволнового предела регистрация отражений от границ во вмещающей среде позволяет решать целый ряд дополнительных задач, например, определение глубины заглубления сваи в опорный горизонт, отслеживание уровня грунтовых вод, определение глубины искусственной насыпи, контроль качества заполнения свай-труб и др.

4. В случае если нет данных о стержневой скорости продольной волны, методика разночастотного возбуждения позволяет провести ее оценку путем наблюдения за отражениями от границ с известным положением по глубине.

5. В случае работы на реальных сваях понятие «длинный» стержень должно иметь более широкий смысл, чем следует из теоретических предпосылок. Стержень можно считать «длинным», если длина более чем в десять раз превышает радиус стержня и в длине укладывается не менее 1-2 длин волн.

В **четвертой главе** анализируются результаты теоретических исследований, а также лабораторных и натурных измерений с целью определения границ применимости модели длинного тонкого стержня и составления методических рекомендаций по применению многочастотной модификации метода SIT. Рассматриваются вопросы получения качественных полевых материалов, алгоритм компьютерной обработки и подход к интерпретации данных с позиций управления акустическим полем.

Анализ большого количества акустических записей, полученных на различных сваях при выполнении условий длинноволнового предела, позволил определить, какими должны быть спектральные характеристики

регистрируемых сигналов, чтобы можно было считать, что условие тонкого стержня выполнено:

1. Для выполнения условия тонкого стержня при работе на металлических сваях необходимо выбирать источник таким образом, чтобы отношение a/λ (для частоты, соответствующей максимуму спектра) находилось в пределах 0,01–0,05 и при этом в спектре зарегистрированных колебаний не было существенной составляющей с отношением $a/\lambda > 0,1$.

2. Для выполнения условия тонкого стержня при работе на железобетонных сваях необходимо выбирать источник таким образом, чтобы отношение a/λ (для частоты, соответствующей максимуму спектра) находилось в пределах 0,01–0,1 и при этом в спектре зарегистрированных колебаний не было существенной составляющей с отношением $a/\lambda > 0,2$.

Методические рекомендации, сформулированные в данной главе, затрагивают круг вопросов, связанных с получением качественных полевых материалов, алгоритмом их компьютерной обработки и интерпретацией данных при решении различных прикладных задач.

Заключение

По результатам проведенного комплекса теоретических исследований, лабораторных и натурных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Сваю, находящуюся во вмещающей среде, необходимо рассматривать в рамках комплексной литотехнической системы свая-грунт. При этом в случае невыполнения условий длинноволнового предела вмещающая среда оказывает влияние на распространяющееся в свае волновое движение.

2. Влияние вмещающей среды проявляется в излучении энергии волн, распространяющихся в свае, во вмещающий массив и возникновении на записях акустического поля отражений от контрастных геологических границ.

3. Лабораторные эксперименты с ультразвуком на модельных стержнях подтвердили теоретические представления о влиянии вмещающей сваю среды в случае невыполнения условий длинноволнового предела. С помощью ультразвуковых измерений во внутренних точках среды показано, что волновое движение, распространяющееся в стержне, испытывает отражения от контрастных границ во вмещающей среде.

4. Отражения от геологических границ, возникающие в случае невыполнения условий длинноволнового предела, можно использовать для решения ряда дополнительных задач (например, определение заглубления сваи в опорный горизонт (рис. 4), контроль заполнения металлических свай-труб, отслеживание уровня грунтовых вод, определение мощности искусственной насыпи и др.). Созданное для реализации принципов управления полем программное обеспечение, позволяет решать данные задачи.

5. Физическая модель сваи, применимая в конкретных условиях измерений, определяется спектральными характеристиками зарегистрированного поля. Предложен критерий, по которому можно судить о применимости модели тонкого стержня в конкретных условиях наблюдений. Для металлических свай: $0,01 < a/\lambda_{\text{ср}} < 0,04$ и $0,04 < a/\lambda_{\text{мин}} < 0,07$, где $\lambda_{\text{ср}}$ – частота, соответствующая максимуму спектра, $\lambda_{\text{мин}}$ – частота, соответствующая верхней границе спектрального диапазона зарегистрированных колебаний. Для железобетонных свай: $0,02 < a/\lambda_{\text{ср}} < 0,08$ и $0,1 < a/\lambda_{\text{мин}} < 0,17$.

6. Понятие «длинный» стержень должно иметь более широкий смысл, чем следует из теоретических предпосылок. Стержень можно считать «длинным», если длина более чем в десять раз превышает радиус стержня и в длине стержня укладывается не менее 1-2 длин волн.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:

1. Капустин В.В., Хмельницкий А.Ю. О возможности использования неоднородных электромагнитных волн для исследования фундаментных конструкций // Вестник Московского Университета. – Сер. 4. Геология. – 2011. – №1. – С. 52-55.

2. Хмельницкий А.Ю., Владов М.Л., Капустин В.В. Экспериментальное исследование влияния вмещающего грунта на распространение акустических волн в свайных конструкциях // Инженерные изыскания. – 2012. – №6. – С. 16-23.

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

4. Хмельницкий А.Ю. Модели толстого и тонкого длинного стержня в безграничной среде и управление ими при определении характеристик свай, находящихся в грунте // Материалы международной молодежной научной конференции «Математическая физика и ее приложения» (МФП-2012) в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» / Под ред. А.В. Санкина и В.И. Алтухова. – Пятигорск. СКФУ, 2012. – Т3. – С.61-62.

5. Хмельницкий А.Ю. К вопросу о контроле качества свайных оснований объектов нефтяных месторождений // Актуальные проблемы науки и техники. Сборник научных трудов V Международной заочной научно-практической конференции молодых ученых. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2012. – С.89-90.

6. Хмельницкий А.Ю. Изучение ограничений поверхностного акустического метода при обследовании свай // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2013» / Отв. ред. А.И. Андреев и др. [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2013. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM). – ISBN 978-5-317-04429-9.