

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
им. А.А. ТРОФИМУКА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



ФЕДИН Константин Владимирович

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЯЧИХ ВОЛН
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., доцент Ю.И. Колесников

Новосибирск – 2014

О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ.....	Стр. 4
ГЛАВА 1. УПРУГИЕ СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ (ОБЗОР).....	
1.1. Резонансные методы исследования упругих свойств горных пород на образцах.....	11 13
1.2. Собственные колебания Земли.....	16
1.3. Инженерная сейсмология.....	19
1.4. Выделение когерентных составляющих микросейсмического поля на основе пересчета разновременных данных к «единому» времени.....	22
Выводы по главе	25
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБНЫХ СТОЯЧИХ ВОЛН, ВОЗБУЖДАЕМЫХ АКУСТИЧЕСКИМИ ШУМАМИ В БАЛКАХ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ.....	
2.1. Методика проведения экспериментов.....	29
2.2. Обработка экспериментальных данных.....	33
2.3. Влияние продольных щелевидных дефектов на изгибные стоячие волны в балке прямоугольного сечения с закрепленными концами.....	40
Выводы по главе	46
ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБНЫХ СТОЯЧИХ ВОЛН В НАДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ.....	
3.1. Методика экспериментов.....	50
3.2. Обработка экспериментальных данных.....	51
3.3. Моделирование частичной или полной потери устойчивости опоры пустой трубы.....	57
3.4. Моделирование частичной или полной потери устойчивости опоры трубы, заполненной жидкостью	62

Выводы по главе.....	70
ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЯЧИХ ВОЛН СЖАТИЯ-РАСТЯЖЕНИЯ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ПОД ДЕЙСТВИЕМ МИКРОСЕЙСМ..	71
4.1. Методика экспериментов.....	73
4.2. Модели верхней части разреза.....	75
4.3. Определение резонансных свойств приповерхностных слоев постоянной мощности.....	76
4.4. Влияние подстилающей среды на резонансные свойства приповерхностного слоя.....	84
4.5. Обсуждение результатов моделирования.....	89
Выводы по главе	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	95

ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования – упругие стоячие волны, генерируемые шумами в ограниченных природных и искусственных объектах, на предмет их применения для решения задач инженерной сейсмологии.

Актуальность исследования.

Упругие стоячие волны широко применяются в сейсмоакустических исследованиях на разных масштабных уровнях. На «микроуровне» стоячие волны разных типов (стержневые продольные, крутильные, изгибные) используются при резонансных измерениях, которые долгое время были основным методом изучения упругих и поглощающих свойств горных пород в лабораторных условиях. Упругие стоячие волны на планетарном уровне – это собственные колебания Земли, изучение которых дает информацию о ее внутреннем строении, вещественном составе, особенностях вращения и т.д.

На промежуточных масштабных уровнях наиболее широкое применение стоячие волны находят в инженерной сейсмологии, где они, в частности, используются при обследовании зданий и сооружений, в основном для оценки их технического состояния и сейсмостойкости. Чаще всего при таких исследованиях колебания в испытываемых конструкциях возбуждают с помощью искусственных источников [Негматуллаев и др., 1979; Лужин и др., 1987; Павленов и др., 1988; Назин, 1993; Способ..., 1994, 1998, 1999¹; Бержинский и др., 2005], что позволяет исследовать собственные частоты, декременты затухания колебаний, а в некоторых случаях и формы стоячих волн. Однако обследование сооружений с искусственными источниками – трудоемкая операция, требующая больших временных и материальных затрат.

Прорывом в этой области инженерной сейсмологии стала разработанная коллективом авторов методика выделения стоячих волн из шумового (микросейсмического) поля [Еманов и др., 2001, 2002, 2007; Еманов и Селезнев, 2003; Активная..., 2004]. Эта методика реализована в технологии обследования зданий и инженерных сооружений, позволяющей по записям микросейсм в

разных точках исследуемых объектов определять значения собственных частот и изучать формы стоячих волн, формирующихся в них под действием микросейсмических колебаний.

Особенностью методики является то, что в каждом отдельном сеансе измерений производится синхронная регистрация колебаний объекта под воздействием микросейсм в неподвижных опорных точках и точках, меняющих свое положение от сеанса к сеансу. Таким образом, даже с малоканальной аппаратурой исследуемый объект может быть покрыт густой сетью наблюдений. Основная проблема при таком способе получения исходных данных состоит в преобразовании к «единому» времени записей, полученных в разных сеансах. Алгоритм такого преобразования реализован разработчиками упомянутой технологии на основе фильтров Винера в предположении о том, что для любой пары точек в исследуемом объекте связь параметров стоячих волн описывается независимой от времени линейной системой, а для бегущих волн такая связь отсутствует.

В последние годы аналог этой методики находит применение и в другой области инженерной сейсмологии – в сейсмическом микрорайонировании [Еманов и др., 2008; Колесников и др., 2012⁵; Kolesnikov et al., 2012², 2013³]. Выделение из зарегистрированного на исследуемом участке микросейсмического поля его когерентных составляющих (стоячих волн) позволяет определять резонансные частоты верхней части разреза (ВЧР), строить карты усиления колебаний на собственных частотах, оценивать точность определения коэффициентов усиления.

Несмотря на то, что данная методика в настоящее время достаточно активно используется в практике инженерно-сейсмологических исследований, перспективы ее применения для решения многих задач инженерной сейсмологии изучены еще далеко не в полной мере. В связи с этим **актуальным** становится экспериментальное исследование возможностей методики на модельных объектах с хорошо контролируемой геометрией и физическими характеристиками. Кроме того, такое моделирование позволяет

изучать характер влияния тех или иных факторов на поле стоячих волн. Основываясь на теории подобия волновых явлений [Ивакин, 1956^{1,2}, 1969; Аверко, 1987^{1,2}, 1988], результаты физического моделирования могут быть в дальнейшем экстраполированы на реальные объекты.

Цель исследования – развитие пассивных методов решения задач инженерной сейсмологии.

Научная задача – экспериментально обосновать и верифицировать на данных физического моделирования инженерно-сейсмологические методы, основанные на выделении стоячих волн из сейсмоакустических шумов.

Основные этапы исследования.

1. Разработка методики физического моделирования стоячих волн, возбуждаемых сейсмоакустическими шумами в ограниченных объектах.
2. Обоснование возможности диагностирования дефектов конструктивных элементов сооружений по стоячим волнам, выделяемым из сейсмоакустического шума (на примере балок прямоугольного сечения и опор трубопроводов).
3. Верификация на физических моделях метода определения резонансных свойств верхней части разреза, основанного на пересчете разновременных микросейсмических данных к «единому» времени.

Фактический материал и методы исследования.

Методы решения поставленных задач базируются на теории подобия упругих волновых явлений [Ивакин, 1956^{1,2}, 1969; Аверко, 1987^{1,2}, 1988 и др.] и математическом аппарате, позволяющем выделять когерентные составляющие волновых полей [Еманов и др., 2001, 2002, 2007; Еманов и Селезнев, 2003, Активная..., 2004], в основе которого лежат теория случайных процессов и методы винеровской фильтрации.

Основной экспериментальный метод – трехмерное физическое моделирование акустических шумовых полей, данные которого послужили фактическим материалом исследования. Моделирование проводилось в

акустическом и ультразвуковом диапазонах частот с применением цифровой регистрирующей аппаратуры.

Для идентификации выделяемых из шумового поля стоячих волн применялось программное обеспечение, разработанное в Алтае-Саянском филиале Геофизической службы СО РАН (АСФ ГС СО РАН) для обработки микросейсмических данных, регистрируемых при обследовании зданий и сооружений. В этом программном комплексе реализованы, в частности, преобразование разновременных записей в «квазисинхронные» данные и выделение из микросейсмического поля его когерентных составляющих (стоячих волн).

При анализе полученных экспериментальных данных широко применялось сопоставление с результатами компьютерного моделирования методом конечных элементов, для чего использовались программные комплексы Abaqus Student Edition и MSC Nastran.

Защищаемые научные результаты.

1. Разработана методика физического моделирования генерируемых шумами упругих стоячих волн, позволяющая проводить их детальные исследования с использованием двухканальной измерительной аппаратуры и искусственного источника шума.
2. В экспериментах на физических моделях определены диагностические признаки двух видов дефектов конструктивных элементов сооружений:
 - продольный щелевидный дефект разнонаправленно изменяет частоты изгибных стоячих волн в балке при ее колебаниях параллельно или перпендикулярно плоскости щели (повышает в первом и понижает во втором случае);
 - потеря устойчивости опоры трубопровода приводит к увеличению числа мод изгибных стоячих волн на данном участке трубы и к частичному или полному исчезновению узлов мод в месте ее ослабленного крепления.
3. На физических моделях верифицирован метод определения резонансных свойств верхней части разреза по выделяемым из микросейсмического поля

стоячим волнам, основанный на пересчете разновременных данных к «единому» времени.

Научная новизна. Личный вклад.

Разработана лабораторная методика выделения стоячих волн из шумового акустического поля, включающая набор операций и приемов, в том числе генерацию акустических шумов в трехмерных моделях с помощью специально изготовленного устройства, цифровую регистрацию шумовых сигналов двумя широкополосными пьезокерамическими датчиками (неподвижным опорным и передвигаемым) и последующую обработку шумовых данных с приведением их к «единому» времени.

На примере простых моделей показана принципиальная возможность применения выделяемых из шумового поля стоячих волн для диагностирования и мониторинга различных объектов на предмет выявления и идентификации возникающих в них дефектов, например, продольных трещин в балках и нарушений устойчивости опор трубопроводов.

На трехмерных физических моделях исследованы возможности детального изучения резонансных свойств верхней части разреза по разновременным записям микросейсм, полученным на плотной сети наблюдений с помощью малоканальной аппаратуры. Результатами моделирования подтверждено, что при использовании малоканальной аппаратуры пересчет разновременных данных к «единому» времени существенно уменьшает погрешности измерений, связанные с нестационарным характером микросейсмического поля.

Все эксперименты, включая подготовку аппаратуры, изготовление моделей, проведение измерений, обработку экспериментальных данных и анализ результатов, выполнены автором лично или при его активном участии. Результаты экспериментов хорошо согласуются с данными компьютерного моделирования методом конечных элементов, что говорит об их высокой достоверности.

Практическая значимость результатов.

Разработанная методика выделения стоячих волн из шумового акустического поля в акустическом и ультразвуковом диапазонах частот может применяться как для модельных исследований возможностей диагностирования различных дефектов в натурных объектах разного вида, так и непосредственно для дефектоскопии небольших объектов.

Выявленные критерии определения продольных трещин в балках могут быть использованы для разработки вариантов методики обследования стоячими волнами различных конструктивных элементов наземных сооружений, а также объектов в горных выработках (целиков, крепей, опор, балок и т.д.). Изменение структуры поля стоячих волн в пролетах трубопроводов вследствие частичной или полной потери устойчивости их опор также может быть использовано при разработке методов контроля состояния таких сооружений.

Выполненные на трехмерных моделях ВЧР исследования их резонансных свойств подтвердили высокую эффективность метода пересчета разновременных записей к «единому» времени, позволяющего существенно повысить качество сейсмического микрорайонирования по микросейсам с помощью малоканальной аппаратуры. Эксперименты показали, что такой пересчет позволяет в значительной мере нивелировать искажения, связанные с нестационарным характером микросейсмического поля.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Всероссийской конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (Новосибирск, 2011), Всероссийской молодежной научной конференции «Трофимуковские чтения молодых ученых» (Новосибирск, 2011), Международных научных студенческих конференциях «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2011, 2012), Всероссийских молодежных научно-практических конференциях «Проблемы недропользования» (Екатеринбург, 2011, 2012), 6th International Siberian Early Career GeoScientists Conference (Новосибирск, 2012), Всероссийской научной конференции

«Полярная механика» (Новосибирск, 2012), Всероссийском семинаре «Геодинамика. Геомеханика и геофизика» (Стационар «Денисова пещера», Алтайский край, 2012), 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Paris, France, 2012), Международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (Новосибирск, 2012, 2013), Near Surface Geophysics Asia Pacific Conference (Beijing, China, 2013), 19th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Bochum, Germany, 2013), Всероссийской конференции «50 лет сейсмологического мониторинга Сибири» (Новосибирск, 2013), Всероссийской научной конференции молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы геологии нефти и газа Сибири» (Новосибирск, 2014).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 23 печатных работах, в том числе в 5 статьях в журналах, рекомендованных Перечнем ВАК («Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых» – 2, «Известия вузов. Горный журнал» – 1, «Технологии сейсморазведки» – 1, «Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика» – 1).

Благодарности. Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность научному руководителю, заведующему лабораторией экспериментальной сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, д.т.н. Ю.И. Колесникову за постоянное внимание и всестороннюю поддержку на всех этапах работы над диссертацией. Автор глубоко благодарен директору Алтае-Саянского филиала Геофизической службы СО РАН, д.т.н. А.Ф. Еманову за внимание к проводимым исследованиям и полезные обсуждения полученных результатов.

Автор признателен сотрудникам АСФ ГС СО РАН А.А. Красникову и А.А. Дураченко за консультации по работе с разработанными в их организации компьютерными программами для обработки экспериментальных данных, а также А.А. Каргаполову и Ю.Г. Карину за участие в проведении экспериментов.

ГЛАВА 1.

УПРУГИЕ СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ (ОБЗОР)

Стоячие волны возникают тогда, когда две гармонические волны с равными периодами и амплитудами распространяются навстречу друг другу [Хайкин, 1962; Исакович, 1973; Пейн, 1979]. В одномерном случае две такие волны, бегущие вдоль оси x , можно описать выражениями

$$a_1 = a_0 \sin(kx - \omega t),$$

$$a_2 = a_0 \sin(kx + \omega t),$$

где a_0 – амплитуда, ω – круговая частота, k – волновое число, t – время.

Просуммировав эти выражения, после несложных тригонометрических преобразований можно получить формулу, описывающую колебательный процесс в стоячей волне:

$$a = 2a_0 \cos(\omega t) \sin(kx)$$

Как видно из этой формулы, в каждой точке x происходят гармонические колебания, амплитуды которых распределены вдоль оси x по синусоидальному закону. Точки, в которых $\sin(kx)$ обращается в нуль, т.е. колебания в которых отсутствуют, называются узлами. Максимальные колебания наблюдаются в точках, для которых $\sin(kx) = 1$ – это пучности колебаний. Так как волновое число связано с длиной волны λ соотношением $k = 2\pi/\lambda$, расстояния между соседними узлами, а также между соседними пучностями равны половине длины волны. На каждом участке между соседними узлами колебания синфазны; в смежных участках колебания происходят в противофазе.

Отсутствие колебаний в узловых точках стоячей волны означает, что через эти точки энергия не переносится, а между ними лишь происходит периодическое превращение кинетической энергии в потенциальную и обратно. В случае, если встречные волны имеют разную амплитуду, они компенсируются не полностью; в результате их интерференции идеальные узлы

со строго нулевыми смещениями не наблюдаются и часть энергии распространяется в виде бегущей волны. В этом случае говорят о коэффициенте стоячей волны [Пейн, 1979].

Стоячие волны могут возникать, например, при отражении бегущих волн от препятствий, когда происходит интерференция падающей и отраженной волн. При этом, в зависимости от условий отражения, на отражающей границе может находиться как пучность (например, при отражении звука в воде от ее границы с воздухом), так и узел колебаний (при отражении от той же границы звука в воздухе) [Лепендин, 1978]. Соответственно, при резонансных явлениях в ограниченных телах с одинаковой геометрией, в зависимости от условий на границах, могут формироваться семейства мод стоячих волн с разными наборами собственных частот. Если на противоположных границах резонирующего тела образуются только пучности или только узлы, то между этими границами будет укладываться целое число полудлин стоячих волн. Соответствующие собственные частоты тела в этом случае равны

$$f_n = \frac{nV}{2l}, \quad (1.1)$$

где V – скорость распространения интерферирующих волн, l – расстояние между границами, n – номер моды стоячей волны.

Если же на одной границе образуются узлы, а на другой пучности, то между ними будет укладываться нечетное число четвертей длин волн. При этом собственные частоты определяются формулой

$$f_n = \frac{(2n-1)V}{4l}. \quad (1.2)$$

При интерференции волн, распространяющихся под углом друг к другу, также возникают стоячие волны. Так, две гармонические волны равной частоты и одинаковой амплитуды, бегущие под углом друг к другу, образуют интерференционную картину, бегущую в одном направлении, но стоячую в другом [Исакович, 1973]. Иначе говоря, суперпозицию волн, бегущих под углом друг к другу, можно рассматривать как волну, стоячую в одном и бегущую без изменения формы в другом направлениях.

Образование стоячих волн может быть обусловлено интерференцией бегущих волн различной физической природы. Можно привести множество примеров стоячих волн разного масштаба, например, электромагнитных (от световых стоячих волн [Калитеевский, 1971] до низкочастотных волн Шумана, возникающих между поверхностью Земли и ионосферой [Sentman, 1995]), волн на поверхности жидкости (от волн в лабораторных опытах [Хайкин, 1962] до весьма низкочастотных сейш в крупных водоемах [Арсеньева и др., 1963]), волн Фарадея, возникающих при параметрических вертикальных резонансах в жидкости [Калиниченко и Секерж-Зенькович, 2007] и т.д. Так как настоящая работа посвящена исследованию упругих стоячих волн, возникающих в физических моделях различных объектов, ниже будут рассмотрены некоторые примеры и особенности применения упругих стоячих волн в различных геофизических приложениях. Далее в тексте под стоячими волнами будут подразумеваться именно упругие стоячие волны.

1.1. Резонансные методы исследования упругих свойств горных пород на образцах

Типичным примером применения стоячих волн в геофизике являются петрофизические исследования упругих свойств горных пород и минералов резонансными методами. Такие исследования проводятся на образцах разной формы, в которых возбуждаются гармонические колебания различных типов (сжатие-растяжение, изгиб и кручение). Частоты наблюдаемых резонансных пиков f_n , как следует из приведенных выше формул, позволяют определить скорости упругих волн соответствующих типов, а отношения к f_n ширины резонансных пиков Δf_n на уровне $1/\sqrt{2}$ их амплитуды являются мерой поглощения этих волн Q_n^{-1} [Мак-Скимин, 1966]. Так как в образцах может возбуждаться семейство стоячих волн, каждой из которых соответствует свой резонанс, то по ним можно исследовать, в том числе, зависимости скоростей и поглощения упругих волн от частоты.

Наибольшее распространение получили измерения на тонких в сравнении с используемыми длинами волн стержневых образцах разной формы. Чаще всего при измерениях используют образцы в виде цилиндров, чтобы избежать необходимости введения поправок, связанных с различными формами поперечного сечения.

Наиболее часто резонансными методами исследуются крутильные и продольные (последние далее будем называть стержневыми волнами) нормальные волны низшего порядка в тонких стержнях, реже – их изгибные колебания. Упругие параметры, определенные по крутильным колебаниям, совпадают с параметрами поперечных волн в безграничной среде (S -волн), а параметры объемных продольных волн (P -волн) можно определить по известным из теории упругости формулам, связывающим их с параметрами продольных стержневых и S -волн.

Резонансным методам исследования упругих свойств горных пород посвящено большое число публикаций. Измерения скоростей и поглощения на сухих образцах проводились с использованием вынужденных колебаний тонких стержней из различных пород: как продольных (стержневых) [например, Born, 1941; Donato et al., 1962; Меркулова, 1968; Pandit and King, 1979; Tittmann et al., 1981; Murphy, 1982, 1984; Winkler and Nur, 1982; Bulau et al., 1984; Blair, 1990], так и крутильных [Pandit and King, 1979; Winkler and Nur, 1982; Murphy, 1984; Blair, 1990 и др.]. Измерения параметров стержневых волн, в том числе на более низких частотах (до нескольких сотен герц), проводились также методом изгибных колебаний тонких стержневых образцов [Bruckshaw and Mahanta, 1954; Donato et al., 1962; Меркулова и Васильцов, 1967; Pandit and Savage, 1973; Spencer, 1981; Tittmann et al., 1981; Bulau et al., 1984].

Кроме измерений на сухих образцах, многими исследователями изучались параметры стержневых волн и на флюидонасыщенных образцах [Murphy, 1982; Winkler and Nur, 1982; Jones and Nur, 1983; Bulau et al., 1984; Morig and Burkhardt, 1989; Paffenholz and Burkhardt, 1989 и др.]. Однако применение резонансных методов для исследования стержневых волн во

флюидонасыщенных образцах вряд ли можно считать обоснованным. Как показано в работах [Dunn, 1986, 1987; White, 1986], специфические граничные условия на свободной боковой поверхности насыщенного пористого стержня приводят к искажению получаемых результатов из-за вязкого течения флюида через открытые поры на границе порода-воздух.

Резонансные методы изучения упругих свойств горных пород широко применялись примерно с середины до 80-х годов прошлого века. Однако в последующие годы большинство измерений упругих свойств стали проводить на объемных образцах небольших размеров с использованием более технологичных импульсных методов. С одной стороны, эти методы обладают определенными преимуществами перед резонансными, например, отсутствуют искажения результатов измерений на флюидонасыщенных образцах, характерные для измерений на тонких стержнях. С другой стороны, из-за используемых высоких частот длины волн при таких измерениях зачастую близки к размерам неоднородностей, что приводит к искажениям из-за усиливающегося влияния рассеяния упругих волн на зернах пород.

В последние годы были разработаны новые резонансные методы исследования объемных образцов, свободные от недостатков измерений на стержневых образцах и в то же время позволяющие снизить искажающее влияние рассеяния в сравнении с импульсными методами за счет применения более низких частот. Это различные модификации так называемого метода резонансной акустической (или ультразвуковой) спектроскопии [Лебедев, 2002; Ulrich et al., 2002; Lebedev et al., 2003, 2005; Zadler et al., 2004; Averbakh et al., 2010; Yoneda et al., 2011]. Этот метод применяется как для определения упругих свойств материалов, в том числе добротности, так и для их неразрушающего контроля. Существуют различные модификации метода, но в целом он сводится к детальному определению экспериментальной резонансной кривой исследуемого объемного образца и последующему решению обратной задачи – подбору предполагаемых свойств материала образца таким образом, чтобы

расчетная резонансная кривая наилучшим образом совпадала с кривой, определенной экспериментально.

Известны отдельные примеры изучения упругих свойств горных пород резонансным методом на сферических образцах [например, Soga and Anderson, 1967; Birch, 1975]. Хотя при измерениях на сферических образцах исследуются, как правило, их вынужденные колебания, природа этих колебаний аналогична свободным (собственным) колебаниям объекта, на многие порядки превышающего по размерам образцы горных пород, а именно земного шара. И резонансные колебания сферических образцов, и собственные колебания Земли являются стоячими волнами, имеющими сходную физическую природу.

1.2. Собственные колебания Земли

Земной шар, как и любое ограниченное упругое тело, может резонировать как единое целое только на определенных дискретных частотах. На этих частотах в результате воздействия различных факторов, например, сильных землетрясений, могут возбуждаться собственные колебания Земли (иногда их называют нормальными модами), также являющиеся типичным примером стоячих волн. Это семейства колебаний двух типов: крутильных (тороидальных) ${}_nT_l$ и сфероидальных ${}_nS_l$, где индексами n и l обозначено число узловых (нодальных) поверхностей внутри земного шара и число секторов, ограниченных такими поверхностями на его поверхности, соответственно.

Крупнейшие землетрясения возбуждают собственные колебания Земли, смещения поверхности при которых иногда измеряются сантиметрами, колебания после таких событий могут продолжаться сутками, а иногда и неделями [Park et al., 2005]. Так как при крутильных колебаниях распределение плотности не меняется, сила тяжести на них не влияет. При сфероидальных же колебаниях возникают возмущения плотности, вследствие чего для очень низкочастотных колебаний (с периодами более примерно 500 с) действием гравитации на собственные колебания ${}_nS_l$ пренебрегать нельзя [Аки и Ричардс,

1983]. Еще одна особенность собственных колебаний Земли, принципиально отличающая их от стоячих волн в объектах меньших размеров (геологических структурах, различных сооружениях, образцах пород и т.д.), связана с вращением Земли, которое приводит к расщеплению некоторых нормальных мод на два спектральных пика [Аки и Ричардс, 1983].

Первые теоретические оценки частоты собственных колебаний для наиболее низкочастотной сфероидальной моды ${}_0S_2$ для сферы с размерами и массой Земли и твердостью стали были получены еще в конце 19-го – начале 20-го веков. Бромвич [Bromwich, 1898] для несжимаемой сферы с учетом самогравитации получил период ${}_0S_2$ равным 55 минутам, а Ляв [Love, 1911] для такой же сжимаемой сферы определил этот период примерно равным часу.

Первые сообщения о наблюдениях собственных колебаний Земли были опубликованы после сильнейшего Чилийского землетрясения 22 мая 1960 г. ($M=9.5$) [Alsop et al., 1961; Benioff et al., 1961; Ness et al., 1961 и др.]. По записям этого события были определены периоды десятков сфероидальных и тороидальных собственных колебаний Земли. Период сфероидальных колебаний ${}_0S_2$ по этим наблюдениям был оценен примерно равным 54 минутам, что хорошо согласуется с ранними теоретическими оценками, полученными Бромвичем и Лявом. В дальнейшем собственные колебания Земли наблюдались многими исследователями, и к настоящему времени число выявленных мод исчисляется сотнями. При этом ведущее место среди методов изучения собственных колебаний Земли принадлежит спектральному анализу. Причина этого, как отмечено в работе [Бат, 1980], заключается в том, что спектр собственных колебаний состоит из множества близко расположенных пиков, которые можно разделить только в спектральной области.

Поскольку собственные частоты Земли зависят, в том числе, от ее внутреннего строения, данные о собственных колебаниях широко используются для исследования основных структурных элементов планеты, а также их упругих параметров, поглощающих свойств и плотности [например, MacDonald and Ness, 1961; Жарков, 1964; Anderson, 1974; Gilbert and

Dziewonski, 1975; Giardini et al., 1987; Ishii and Tromp, 1999; Laske and Masters, 1999; Beghein and Trampert, 2003; Deuss et al., 2010]. Наиболее веские доказательства того, что внутреннее ядро твердое [Dziewonski and Gilbert, 1971] и анизотропное [Woodhouse et al., 1986; Tromp, 1993; Romanowicz and Breger, 2000], также получены при изучении собственных колебаний Земли.

Кроме того, низкочастотные собственные колебания позволяют уточнять энергетические, геометрические и временные параметры очагов крупных землетрясений [например, Stein and Okal, 2005; Park et al., 2005]. В частности, авторам работы [Beroza and Jordan, 1990] анализ низкочастотных сфероидальных мод собственных колебаний Земли позволил выделить среди землетрясений с магнитудами $M_w > 6.0$ некоторое число «медленных» землетрясений с аномально большой длительностью вспарывания в очаге, а также «тихих» землетрясений, не наблюдавшихся на телесеismicких расстояниях в виде волновых пакетов, но возбуждавших собственные колебания Земли.

Обычно считается, что собственные колебания Земли являются относительно кратковременным явлением, следующим за землетрясением, хотя колебания после крупнейших землетрясений могут продолжаться сутками и даже неделями [Park et al., 2005]. Однако еще в семидесятых-восемидесятых годах прошлого века ленинградскими сейсмологами было доказано, что возбуждение собственных колебаний Земли в отсутствие сильных землетрясений представляет собой реально существующее сейсмическое явление [Линьков, 1987].

Это подтвердили полученные впоследствии данные о непрерывном возбуждении свободных колебаний Земли, в основном низкочастотных фундаментальных сфероидальных мод, основанные на записях, сделанных с помощью сверхпроводящего гравиметра в Восточной Антарктиде [Nawa et al., 1998], а также широкополосных сейсмограммах с 13 станций глобальной сети [Kobayashi and Nishida, 1998]. Так как сильные землетрясения происходят относительно редко, авторы предположили, что такое непрерывное

возбуждение связано с атмосферными и океаническими (приливы, прибой, трение воды о дно океана) воздействиями. По-видимому, к этому можно добавить и другие виды возмущений от относительно слабых сейсмических источников как естественного, так и техногенного происхождения.

Подобный механизм приводит к образованию стоячих волн в природных и искусственных объектах меньших размеров, таких как различные геологические структуры, промышленные и гражданские сооружения и т.д. На этом физическом явлении базируется метод выделения стоячих волн из шумов (ультразвуковых, акустических, сейсмических), в последние годы активно применяющийся для решения различных задач инженерной геофизики [Еманов и др., 2001, 2002, 2007, 2008; Еманов и Селезнев, 2003]. Основные положения этого метода будут рассмотрены в конце данной главы.

1.3. Инженерная сейсмология

В инженерной сейсмологии наиболее активно стоячие волны используются при обследовании зданий и сооружений, в основном для определения их динамических характеристик (собственных частот, декрементов затухания и формы колебаний), которые используются для оценки технического состояния или мониторинга исследуемых объектов. Как правило, для таких исследований в испытываемых конструкциях возбуждают колебания с помощью искусственных источников.

В частности, для определения динамических характеристик исследуемого объекта в нем могут возбуждаться вынужденные квазигармонические колебания с изменяющейся в достаточно широком диапазоне частотой с использованием механических вибраторов [Лужин и др., 1987; Павленов и др., 1988; Бержинский и др., 2005]. Динамические испытания с искусственно создаваемыми вибрационными нагрузками в принципе позволяют исследовать как собственные частоты и декременты затухания колебаний, так и, при

определенных условиях, формы стоячих волн в исследуемых объектах. Однако этот метод достаточно трудоемок и требует больших временных затрат.

В натурных условиях такие динамические характеристики, как собственные частоты и декременты затухания, проще определять по свободным колебаниям исследуемых объектов в результате импульсного воздействия на них. Такие воздействия могут осуществляться, например, путем подземного подрыва групп зарядов взрывчатых веществ (ВВ), устанавливаемых на разных уровнях в непосредственной близости от исследуемого объекта [Негматуллаев и др., 1979].

Воздействие может производиться и непосредственно на объект, например, с помощью устанавливаемых на стены сооружения групп ударников на которые нанесены заряды ВВ [Способ..., 1994], последовательностью ударных импульсов, формирующейся пульсирующим сверхзвуковым управляемым газовым потоком [Способ..., 1998], последовательностью импульсов малой мощности, возбуждаемых механическим ударным устройством [Способ..., 1999¹] и т.д. Еще один способ возбуждения собственных колебаний испытуемого объекта сводится к приложению к нему статической горизонтальной нагрузки с помощью мощного гидравлического домкрата с последующим ее мгновенным снятием [Назин, 1993].

В последние годы получили развитие методы исследования динамических характеристик зданий и сооружений, не предполагающие применения каких-либо искусственных источников, возбуждающих в этих объектах стоячие волны. Исходными данными для этих методов являются записи микросейсм, зарегистрированные в исследуемом здании или сооружении, иногда дополненные синхронными записями других измерений, например, атмосферного давления [Способ..., 2004] или скорости и направления ветра [Способ..., 2009].

Наиболее широкое применение в практике обследования зданий и сооружений стоячими волнами, выделяемыми из поля микросейсм, получила методика, разработанная в Геофизической службе СО РАН [Способ..., 1999²;

Еманов и др., 2001, 2002, 2007; Еманов и Селезнев, 2003, Активная..., 2004]. Методика основана на пересчете разновременных данных, зарегистрированных малоканальной аппаратурой на плотной сети наблюдений в исследуемом объекте, к «единому» времени с использованием синхронных записей микросейсм, полученных в опорных точках [Способ..., 2000].

Такой пересчет позволяет эффективно выделять из микросейсмического поля его когерентные составляющие, а именно, стоячие волны, формирующиеся в объекте в результате воздействия микросейсм. В результате могут быть построены детальные карты распределения амплитудных и фазовых спектров стоячих волн в здании или сооружении, позволяющие анализировать не только собственные частоты, но и особенности форм стоячих волн разной природы. Пример полученного по такой методике распределения амплитудных спектров по длине плотины Саяно-Шушенской ГЭС представлен на рисунке 1.1. На рисунке разрастания амплитуд на соответствующих собственных частотах плотины соответствуют пучностям стоячих волн.

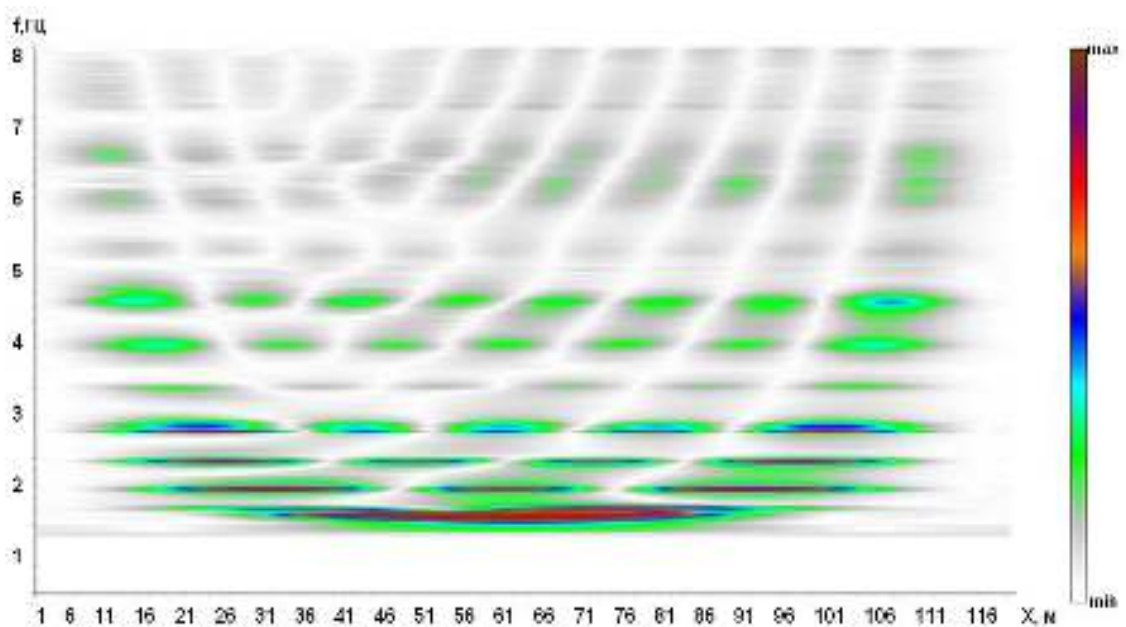


Рисунок 1.1 – Распределения амплитудных спектров по длине Саяно-Шушенской ГЭС (рисунок приведен с разрешения АСФ ГС СО РАН). Цветовая шкала отражает диапазон изменения амплитуд спектральных составляющих

В последние годы аналог этой методики находит применение и в другой области инженерной сейсмологии – в сейсмическом микрорайонировании [Еманов и др., 2008; Колесников и др., 2012; Kolesnikov et al., 2012², 2013³]. Выделение когерентных составляющих микросейсмического поля, зарегистрированного на исследуемом участке, позволяет определять резонансные частоты верхней части разреза, строить карты усиления колебаний на собственных частотах, оценивать точность определения коэффициентов усиления.

Основные положения метода пересчета разновременных данных к единому времени, реализованного в данной методике, описаны в следующем разделе, а результаты исследования на данных трехмерного физического моделирования его возможностей при решении задач инженерной сейсмологии представлены в последующих главах.

1.4. Выделение когерентных составляющих микросейсмического поля на основе пересчета разновременных данных к «единому» времени

В данном разделе остановимся лишь на основных положениях метода, позволяющего выделять когерентные составляющие (стоячие волны) из микросейсмического поля, зарегистрированного на плотной системе наблюдений с помощью малоканальной аппаратуры. В деталях этот метод, основанный на преобразовании разновременных записей к «единому» времени, описан в цикле работ его авторов [Еманов и др., 2001, 2002, 2007; Еманов и Селезнев, 2003, Активная..., 2004].

Если геометрическая форма стоячей волны описывается функцией $A(x, y, z)$, то выражение для колебаний, связанных с этой волной, можно записать в следующем виде:

$$f(x, y, z, t) = A(x, y, z) \cos[\omega_m t + \varphi_m(x, y, z)], \quad (1.3)$$

где $\varphi_m(x, y, z)$ – фаза колебаний в заданной точке для m -й моды стоячих волн, ω_m – ее круговая частота. Параметры стоячих волн зависят как от строения объекта, так и от физических свойств материалов, из которых он состоит.

Важным свойством стоячих волн, коренным образом отличающим их от волн бегущих, является когерентность во времени колебаний во всех точках, где конкретная стоячая волна существует. Для стоячих волн линейная связь между записями колебаний любых двух точек не зависит от времени.

Основная проблема, которую призван решить данный метод, состоит в выделении стоячих волн из общего микросейсмического поля, поскольку сейсмоприемники, установленные в разных точках исследуемого объекта, регистрируют как стоячие, так и бегущие волны. В используемую при построении алгоритма такого выделения математическую модель сейсмических колебаний заложены следующие предположения:

1. В исследуемом объекте отличия формирующихся стоячих волн, зарегистрированных в двух произвольных точках, описываются линейной системой, характеристика которой не зависит от времени.
2. Отличия бегущих волн, зарегистрированных в двух произвольных точках, не могут быть описаны линейной системой, характеристика которой не зависит от времени.
3. Линейные связи для стоячих волн, регистрируемых в двух точках, существуют для каждой пары одноименных компонент колебаний.

Последний принцип значительно упрощает поставленную задачу, позволяя использовать каждую компоненту колебаний независимо от других. Отсюда модель связи колебаний между двумя разными точками объекта, одну из которых будем считать опорной, принимает следующий вид:

$$\overline{f_0}(t) = f_0(t) + w_0(t), \quad (1.4)$$

$$\overline{f_i}(t) = f_0(t) * h_{0i}(t) + w_i(t) \quad (1.5)$$

где $h_{0i}(t)$ – импульсная характеристика линейной системы, описывающей связь между одновременными записями стоячих волн в точках 0 (опорной) и i на

обследуемом объекте, $w(t)$ – бегущие волны, $f_0(t)$ – колебания стоячей волны в опорной точке.

Для такой модели колебаний в ограниченном объекте можно получить «одновременные» записи стоячих волн в разных точках из разновременных наблюдений, используя синхронные с ними записи в опорной точке. Процедура обработки в этом случае сводится к следующим операциям:

1. Нахождение частотных характеристик $H_{oi}(\omega)$ линейных систем, связывающих колебания в опорной и передвижной точках наблюдений.
2. Запись или формирование независимой реализации процесса колебаний опорной точки при сейсмическом воздействии на исследуемый объект.
3. Пересчет стоячих волн из опорной точки с использованием $H_{oi}(\omega)$ во все точки исследуемого объекта.

Частотные характеристики $H_{oi}(\omega)$ ищутся в виде оптимальных фильтров Винера [Бендат и Пирсол, 1971], позволяющих преобразовать сигнал $\bar{f}_0(t) = f_0(t) + w_0(t)$ в запись стоячей волны в точке i . Формула для расчета оценки фильтра Винера, обеспечивающего пересчет колебаний из опорной точки в i -ю, имеет следующий вид:

$$H'_{oi}(\omega) = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{F}_i(\omega) \bar{F}_0^*(\omega)}{\sum_{j=1}^n |\bar{F}_0(\omega)|^2}, \quad (1.6)$$

где $\bar{F}_i(\omega)$ – спектр $\bar{f}_i(t)$; $\bar{F}_0(\omega)$ и $\bar{F}_0^*(\omega)$ – спектр и комплексно-сопряженный спектр $\bar{f}_0(t)$, соответственно.

Формула (1.6) позволяет рассчитывать характеристики фильтра с погрешностью, которая зависит от параметров зарегистрированной реализации естественных колебаний исследуемого объекта. Такими параметрами являются шаг дискретизации по времени Δt , длина единичного блока T и количество блоков в записи n . Выбор первых двух параметров не вызывает затруднений. Шаг дискретизации увязывается с частотным диапазоном, в котором изучается

реакция объекта на сейсмическое воздействие. Длина единичного блока связана с необходимым разрешением спектрального анализа $\Delta f = 1/T$. Сложнее вопрос о количестве блоков. Расчет по формуле (1.6) является лишь некоторой оценкой характеристики фильтра, погрешность которой зависит от n и соотношения энергии помех и полезных сигналов.

Для оценки количества блоков, необходимых для обеспечения заданной погрешности фильтра, по записям микросейсмических колебаний в опорной и i -й точках обследуемого объекта рассчитывается спектр когерентности $\gamma_{oi}(\omega)$

$$\gamma_{oi}^2(\omega) = \frac{\left| \sum_{j=1}^n \overline{F_i}(\omega) \overline{F_0}^*(\omega) \right|^2}{\sum_{j=1}^n |\overline{F_0}(\omega)|^2 \sum_{j=1}^n |\overline{F_i}(\omega)|^2}, \quad (1.7)$$

который позволяет получить приближенное выражение для оценки амплитудной погрешности фильтра $H'_{oi}(\omega)$:

$$\varepsilon(\omega) \approx \frac{\sqrt{1 - \gamma_{oi}^2(\omega)}}{|\gamma_{oi}(\omega)| \sqrt{2n}}. \quad (1.8)$$

Как следует из этой формулы, с увеличением числа блоков погрешность фильтра уменьшается, что позволяет выбирать оптимальную для конкретных условий длину регистрируемых записей. Описанный алгоритм реконструирует «одновременные» записи в разных точках исследуемого объекта по разновременным записям в этих точках, полученным с использованием малоканальной аппаратуры, и синхронным с ними записям в опорной точке. Накопление спектров квазисинхронных данных дает возможность выделить из шумового (микросейсмического) поля когерентные стоячие волны.

Выводы по главе

1. Упругие стоячие волны находят широкое применение в различных геофизических приложениях на разных масштабных уровнях: от ультразвуковых исследований образцов горных пород до земного шара в целом.

2. Одно из важнейших прикладных направлений применения стоячих волн в геофизике – решение задач инженерной сейсмологии, таких как обследование зданий и сооружений и сейсмическое микрорайонирование.
3. Эффективным инструментом для детального исследования стоячих волн с использованием малоканальной аппаратуры и без применения искусственных источников является метод выделения когерентных составляющих микросейсмического поля, основанный на пересчете разновременных данных к «единому» времени.

ГЛАВА 2.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБНЫХ СТОЯЧИХ ВОЛН, ВОЗБУЖДАЕМЫХ АКУСТИЧЕСКИМИ ШУМАМИ В БАЛКАХ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Строительство и эксплуатация как гражданских, так и промышленных зданий и сооружений в обязательном порядке сопровождаются комплексом мероприятий, связанных с обеспечением устойчивости как сооружений в целом, так и отдельных их компонентов. Важная роль в ряду таких работ отводится методам контроля и мониторинга состояния несущих и других конструктивных элементов сооружений. К числу наиболее эффективных методов этой группы относятся сейсмоакустические методы.

Как отмечалось в главе 1, в последние годы разработана и успешно применяется в ряде организаций технология обследования инженерных сооружений методом стоячих волн [Еманов и др., 2001, 2002, 2007; Еманов и Селезнев, 2003, Активная..., 2004]. Технология позволяет по разновременным записям микросейсм, полученных с помощью малоканальной аппаратуры во многих точках исследуемых объектов, и синхронным с ними записям микросейсм в одной или нескольких опорных точках определять значения собственных частот и изучать формы стоячих волн, формирующихся в сооружениях под действием микросейсмических колебаний.

Геометрия форм стоячих волн, частотные и фазовые характеристики собственных колебаний зависят от строения объекта, от его физических свойств, а также от граничных условий. Поэтому стоячие волны могут быть использованы как для разовых обследований сооружений с целью выявления в них различного рода дефектов, так и для мониторинговых наблюдений, позволяющих отслеживать изменение свойств исследуемых объектов во времени.

Как правило, реальные сооружения имеют сложную конструкцию, к тому же свойства материалов, из которых они изготовлены, не всегда могут быть

определены с достаточной для построения расчетных моделей точностью. Это затрудняет исследование на математических моделях влияния разного рода дефектов, изменения физических свойств материала или внешних условий на возникающие в различных объектах под действием микросейсм стоячие волны. В связи с этим становится актуальным экспериментальное исследование стоячих волн, формирующихся под действием акустических шумов в физических моделях с хорошо контролируемой геометрией и физическими характеристиками. Такое физическое моделирование позволяет изучить характер влияния тех или иных факторов на поле стоячих волн в различных объектах. Результаты моделирования, согласно теории подобия волновых явлений [Ивакин, 1956^{1,2}, 1969; Аверко, 1987^{1,2}, 1988], могут быть экстраполированы на соответствующие критериям подобия реальные объекты.

В данной главе описана методика и представлены результаты физического моделирования стоячих волн, формирующихся под действием акустических шумов в балках прямоугольного сечения, в том числе с щелевидными дефектами [Каргаполов и Федин, 2011, 2012; Колесников и др., 2012²; Федин и Каргаполов, 2012^{1,2}; Федин и др., 2011¹⁻³, 2012; Fedin, 2012]. Для выделения стоячих волн из шумового поля использован лабораторный вариант упомянутой выше методики обследования зданий и сооружений, основанный на описанном в разделе 1.4 методе пересчета разновременных данных к «единому» времени. Кроме оценки эффективности применения данной методики в высокочастотном (килогерцовом) диапазоне частот, целью экспериментов было продемонстрировать на относительно простых моделях принципиальную возможность ее применения для диагностики и мониторинга различных объектов с целью выявления и локализации возникающих в них дефектов.

2.1. Методика проведения экспериментов

Методическим вопросам физического моделирования сейсмических волновых явлений уделяется внимание практически во всех публикациях по данной проблематике, начиная с ранних и кончая недавними работами [см., например, Terada and Tsuboi, 1927; Кречмер и Ржевкин, 1937; Ивакин, 1969; Шамина, 1981; Гик, 1983; Аверко и Максимов, 1984; Бобров и др., 1984; Шамина и Понятовская, 1993; Колесников и Игнатов, 1994; Караев и др., 2010; Cooper et al., 2010; Bretaudeau et al., 2011; De Cacqueray et al., 2011]. Однако методика моделирования упругих стоячих волн, возбуждаемых сейсмоакустическими шумами в ограниченных объектах, до настоящего времени не была разработана.

Ниже описаны аппаратура и методические приемы, применявшиеся нами при моделировании акустических шумов в балках, а в следующем разделе на примере обработки экспериментальных данных, полученных для незакрепленной балки, иллюстрируется возможность выделения стоячих волн из шумового поля в килогерцовом диапазоне. Эта методика применялась при получении результатов, описанных в последнем разделе данной главы, а также (с небольшими изменениями) и в экспериментах, результаты которых представлены в третьей и четвертой главах.

В качестве моделей балок прямоугольного сечения использовались образцы в форме параллелепипедов толщиной 3.5 см и шириной 7 см, длина которых в разных экспериментах варьировалась в пределах 49.5 – 50 см. Образцы были изготовлены из бетона на основе смеси речного песка с размерами частиц менее 3 мм и цемента М400 в пропорции 2:1. Поскольку данный материал по механическим и плотностным свойствам близок ко многим строительным материалам, подобие изучаемых волновых явлений в моделях и натурных объектах определяется в основном их геометрическими характеристиками [Ивакин, 1956^{1,2}, 1969]. В частности, при одинаковой форме

модели и натурального объекта отношение частот одноименных стоячих волн в них должно быть обратно пропорциональным отношению их размеров.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.1. Регистрация акустических шумов, имитирующих микросейсмы в натуральных условиях, осуществлялась с помощью двух ультразвуковых датчиков, один из которых использовался как опорный и устанавливался неподвижно на поверхности модели, а другой в ходе экспериментов последовательно перемещался по продольному профилю вдоль одной из больших граней модели балки, что позволяло обеспечить необходимую детальность наблюдений. Широкополосные датчики поршневого типа были изготовлены на основе дисков из пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 2 мм и толщиной 1 мм. Оси максимальной чувствительности датчиков ориентировались перпендикулярно к поверхностям, на которых проводились измерения.

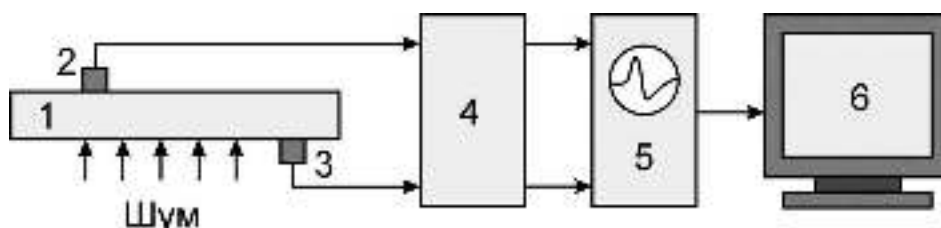


Рисунок 2.1 - Схема эксперимента: 1 – модель, 2 – передвижной и 3 – опорный ультразвуковые датчики, 4 – усилитель, 5 – цифровой осциллограф, 6 – персональный компьютер

После каждой установки передвижного датчика в новой точке профиля наблюдений производилась синхронная запись сигналов от двух датчиков с частотой дискретизации 100 кГц длительностью примерно 6.5 с каждая. Шумовые сигналы от датчиков после усиления подавались на двухканальный цифровой осциллограф В-423 и затем в цифровом виде записывались на жесткий диск персонального компьютера для последующей обработки.

Поскольку эксперименты были направлены на изучение стоячих волн, формирующихся в различных объектах под действием шумового поля, необходимым условием для получения кондиционных данных было превышение уровня акустических шумов над шумами иной природы

(электрическими помехами, внутренними шумами аппаратуры и т.д.). Результаты предварительных экспериментов показали, что регистрируемые в лабораторных условиях акустические шумы не превышают по интенсивности собственные шумы аппаратуры и внешние электрические помехи.

Поэтому в экспериментах приходилось принимать меры для повышения интенсивности «полезного» акустического шума. Возбуждение в моделях дополнительного шумового поля, имитирующего микросейсмы в натуральных объектах, в большинстве случаев производилось с помощью устройства, работающего по принципу автомобильных стеклоочистителей («дворников») – шум генерировался в результате возвратно-поступательного движения щетки с жесткой щетиной по поверхности исследуемого объекта (рисунок. 2.2).

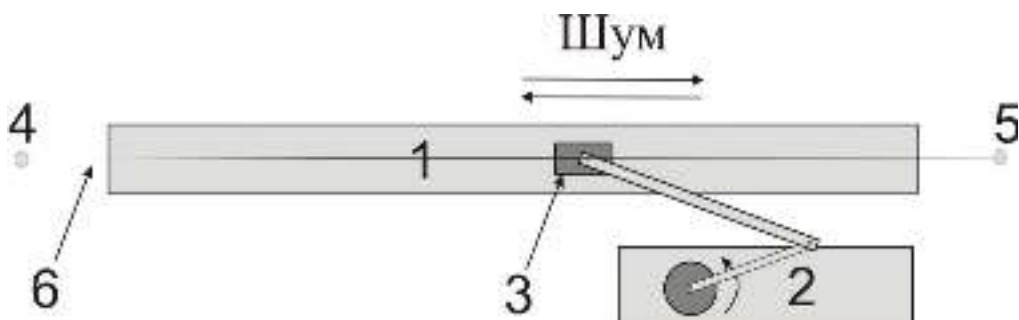


Рисунок 2.2 - Схема генерации дополнительного акустического шума: 1 – модель, 2 – электродвигатель, 3 – щетка, 4–5 – опоры для фиксации направляющей струны, 6 – направляющая струна

На рисунке. 2.3 приведены фрагменты шумовых записей, полученных с помощью этого устройства (трассы 1-3), в сравнении с записями естественных акустических шумов (трасса 4). Амплитудные спектры этих записей показаны на рисунке 2.4 (для наглядности масштаб оси ординат на спектре естественных шумов увеличен в 20 раз). Как можно видеть из рисунков, во всем частотном диапазоне (до 200 кГц) уровень акустических шумов при их дополнительной генерации как минимум на порядок превышает уровень естественных акустических шумов и шумов иной природы.

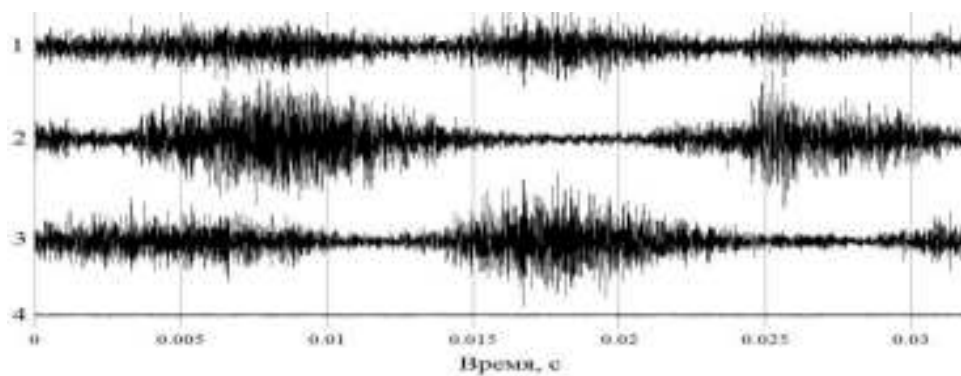


Рисунок 2.3 - Примеры записей искусственно генерируемых (1-3) и естественных (4) акустических шумов на поверхности бетона

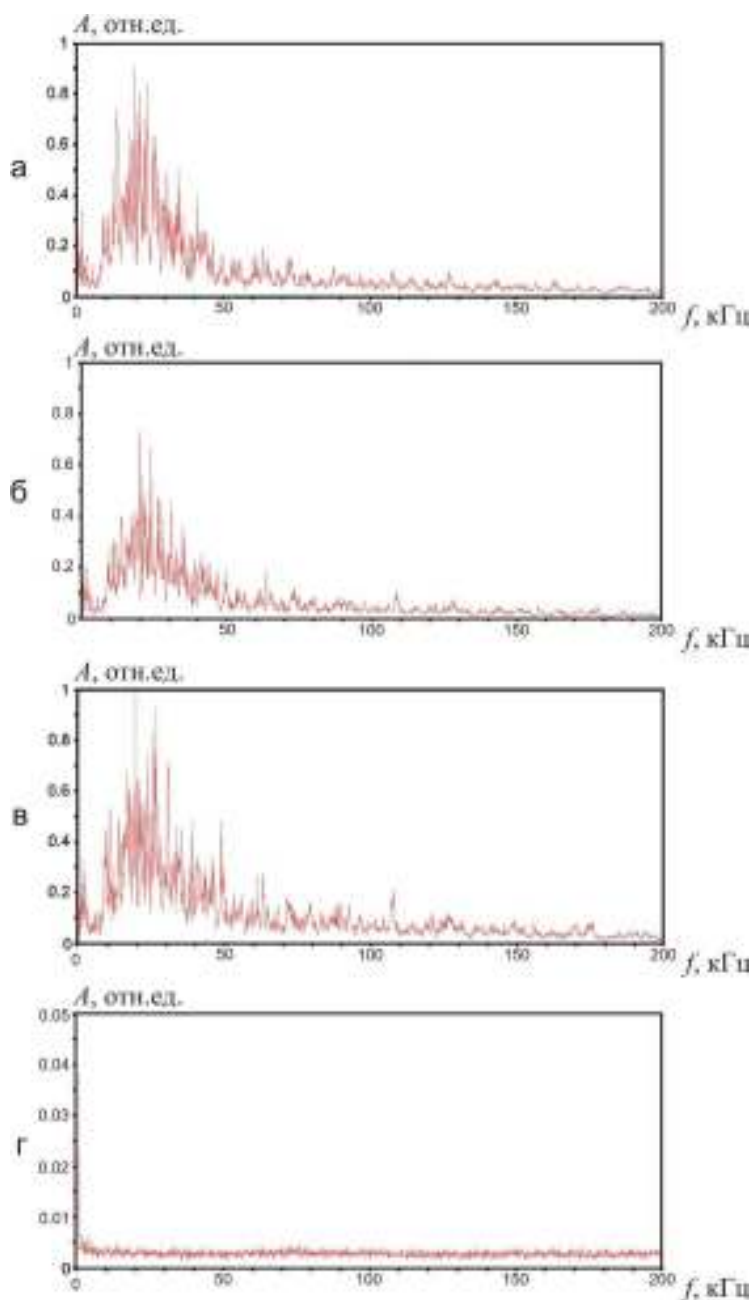


Рисунок 2.4 - Спектры искусственных акустических шумов (а-в) и естественного шума (г)

Хотя спектры искусственного шума в общих чертах похожи (в частности, имеют повышенные амплитуды в диапазоне 10–50 кГц), можно видеть, что генерируемый шум имеет нестационарный характер – от записи к записи меняются как его амплитудные, так и частотные свойства. Учитывая, что источник, кроме того, не находился в фиксированной точке, а постоянно менял положение, генерируемый им акустический шум можно считать достаточно адекватной моделью микросейсм, воздействующих на натурные объекты в реальных условиях.

2.2. Обработка экспериментальных данных

Как показало предварительное численное моделирование методом конечных элементов, выполненное с помощью программного комплекса Abaqus Student Edition [<http://www.simulia.com/academics/student.html>], в килогерцовом диапазоне частот при выбранной методике наблюдений после обработки шумового поля из всего многообразия стоячих волн наилучшим образом должны выделяться именно изгибные колебания образцов. При установке датчиков на больших гранях образца регистрируются преимущественно его колебания по толщине (схематическое изображение на примере второй моды показано на рисунке 2.5а), а при расположении датчиков на средних по площади гранях – колебания по ширине образца (рисунке 2.5б).

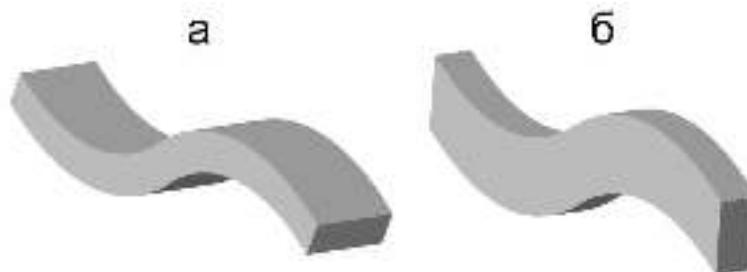


Рисунок 2.5 - Схематическое изображение (в увеличенном масштабе) изгибных колебаний балки по толщине (а) и по ширине (б) для второй моды стоячих волн

Для определения частот мод таких изгибных стоячих волн, являющихся собственными частотами образца, рассчитывался обобщенный амплитудный

спектр, полученный осреднением амплитудных спектров шумовых записей по времени и по всем точкам профиля наблюдений. Для осреднения по времени исходные шумовые записи разбивались на блоки по 8196 отсчетов, для них вычислялись амплитудные спектры, которые затем осреднялись. Дальнейшее осреднение по всем точкам наблюдений позволяло нивелировать эффект исчезновения пиков отдельных мод стоячих волн в спектрах записей, зарегистрированных в точках вблизи узлов этих мод.

Пример обобщенного спектра для изгибных колебаний по толщине незакрепленной монолитной балки из бетона длиной 50 см, лежащей без жестких опор на поролоновой подложке, приведен на рисунке 2.6. Как видно из рисунка, в обобщенном спектре наблюдается квазипериодическое чередование хорошо выраженных пиков, характерное для свободных стоячих волн в ограниченном теле.

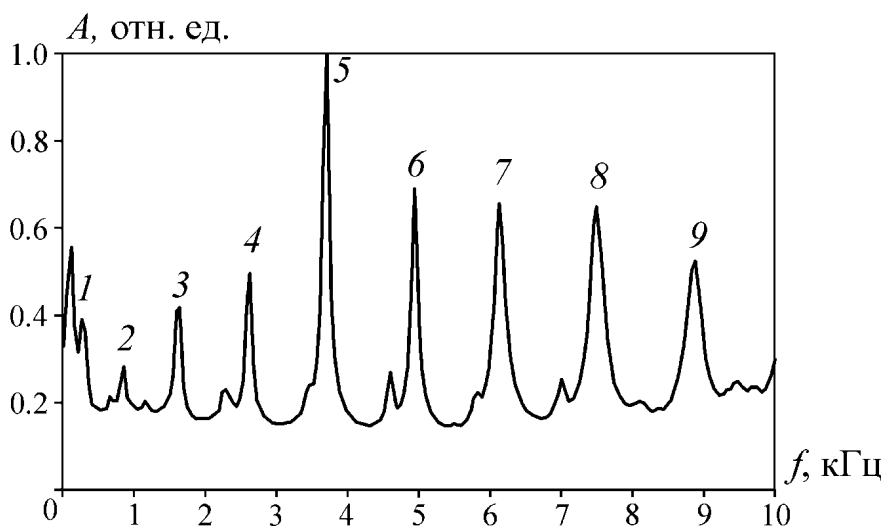


Рисунок 2.6 - Пример обобщенного амплитудного спектра шумового поля в прямоугольной балке. Цифрами отмечены частотные пики соответствующих мод изгибных стоячих волн

Постепенное увеличение интервалов между соседними пиками с ростом частоты обусловлено геометрической дисперсией скорости изгибных волн, которая, как известно, сильно зависит от частоты даже в случае идеальной упругости [Стрелков, 1964; Микер и Мейтцлер, 1966; Исакович, 1973]. Для тонких стержней и пластин, поперечные размеры которых много меньше длины

волны, скорость изгибных волн пропорциональна корню из частоты, в более высокочастотной области скорость с частотой растет медленнее.

Для идентификации стоячих волн, т. е. для установления соответствия наблюдаемых пиков конкретным модам стоячих волн, применялась программа, разработанная в Алтае-Саянском филиале ГС СО РАН для обработки микросейсмических данных, регистрируемых при обследовании зданий и сооружений. В этой программе реализована описанная в разделе 1.4 процедура преобразования разновременных данных к «единому» времени на основе пересчета фильтрами Винера. Эта процедура позволяет эффективно выделять на фоне некогерентного шума когерентные колебания, связанные со стоячими волнами.

Пример такого выделения приведен на рисунке 2.7, показывающем формы изгибных мод (по толщине образца) в виде распределения амплитудных спектров вдоль продольного профиля на поверхности наибольшей грани образца. На рисунке каждой изгибной моде соответствует чередование вдоль профиля наблюдений на характерной для нее собственной частоте максимумов (пучностей стоячих волн) и минимумов (узлов стоячих волн) амплитудных спектров. Анализ такой интерференционной картины позволяет не только подтвердить, что выделены именно изгибные волны, но и определить, какой моде стоячих волн соответствует пик на обобщенном спектре (см. рисунок 2.6).

На рисунке 2.8 приведено поле изгибных волн, полученное по тем же данным, что и поле на рисунке 2.7, но до их пересчета к «единому» времени. Как можно видеть, и в этом случае идентифицируются стоячие волны, но из-за нестационарного характера шума отдельные моды в этом случае выделяются несколько хуже, пучности более «размыты» по оси частот.

Для восьми мод изгибных стоячих волн в незакрепленной балке прямоугольного сечения из бетона было проведено сравнение собственных частот, определенных экспериментально по обобщенному спектру, и рассчитанных численно. Сравнение для первой (низшей) моды не проводилось в связи с ее недостаточно надежной идентификацией.

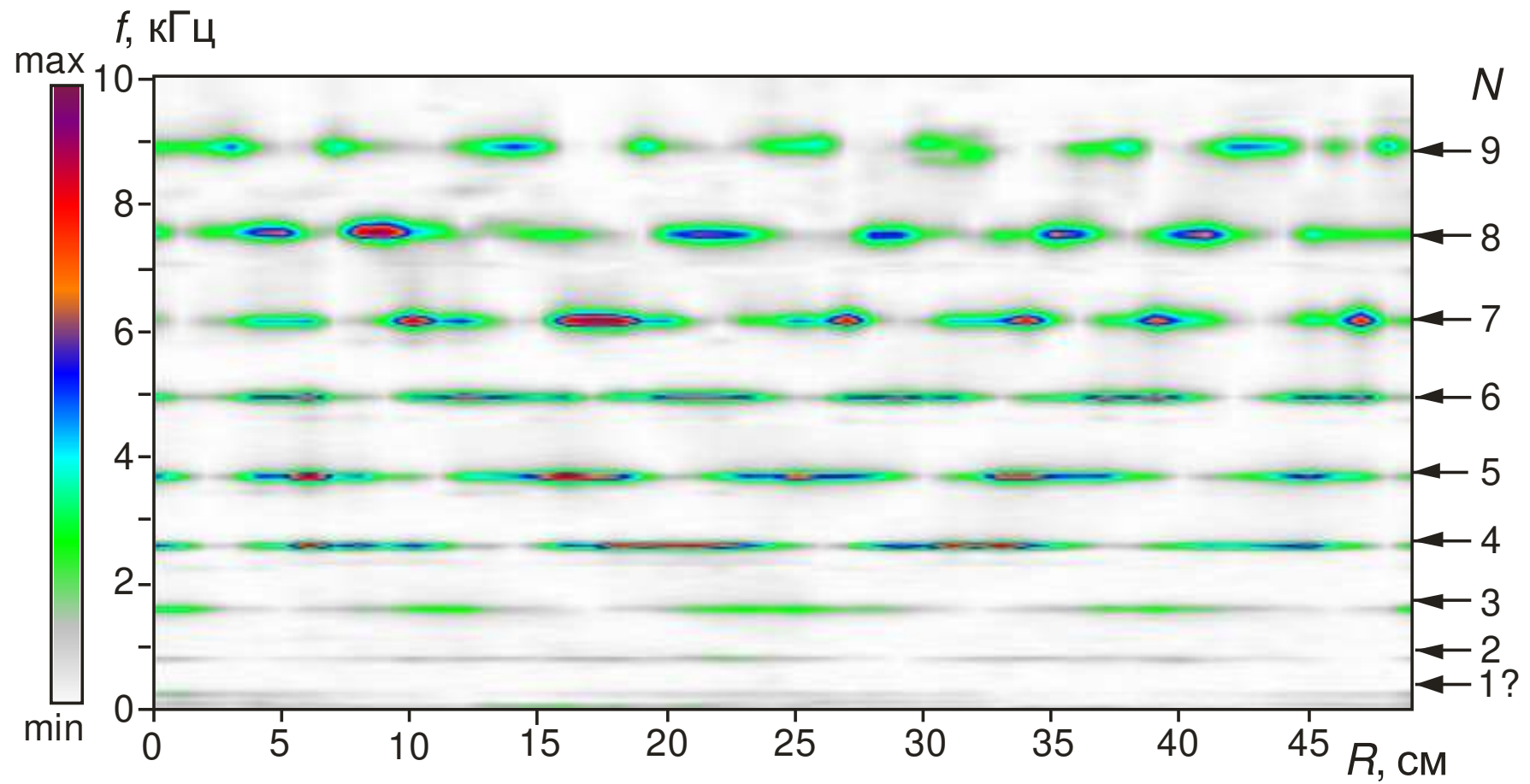


Рисунок 2.7 - Восстановленное из акустических шумов поле изгибных стоячих волн в незакрепленной балке, f – частота, R – расстояние вдоль исследуемого профиля, N – номер моды. Цвет отражает амплитуду спектральных составляющих

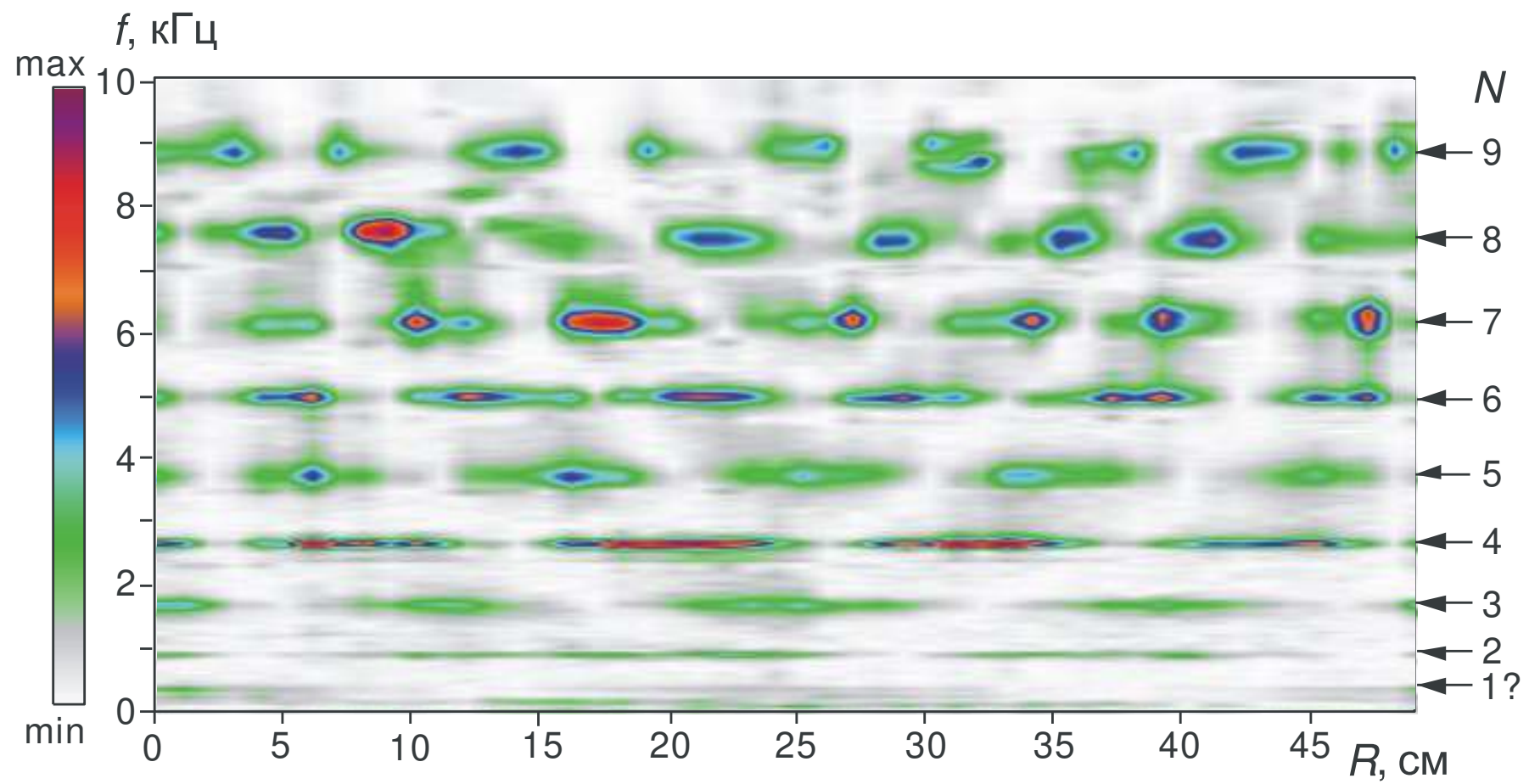


Рисунок 2.8 - Поле изгибных стоячих волн до пересчета к «единому» времени

Численные расчеты проводились методом конечных элементов с помощью свободно распространяемого программного комплекса Abaqus Student Edition [<http://www.simulia.com/academics/student.html>]. После получения в дальнейшем доступа к разработанному в НАСА более мощному программному комплексу MSC Nastran [Рычков, 2004] эти расчеты были продублированы с практически идентичными результатами (все остальные приводимые далее в тексте диссертации результаты расчетов методом конечных элементов также получены с помощью программного комплекса MSC Nastran). При расчетах задавались точные геометрические размеры модели, шаг расчетной сетки 10 мм и экспериментально определенные данные о плотности ρ и скоростях продольных V_p и поперечных V_s волн в исследуемом образце: $\rho = 1.94 \text{ г/см}^3$, $V_p = 2530 \text{ м/с}$, $V_s = 1490 \text{ м/с}$. Погрешности при измерении этих параметров не превышали 0.5% для плотности и 1.5% для скоростей упругих волн.

Использувавшиеся для расчетов программные комплексы позволяли моделировать разные виды механического воздействия на изучаемые объекты (импульсное, гармоническое, шумовое). В нашем случае при компьютерном моделировании акустическое воздействие задавалось в виде колебаний типа «белый шум» на нижней грани образца, что наиболее близко соответствовало условиям проведенных лабораторных экспериментов. Результатами расчетов являлись значения частот и амплитуд различных мод. Также была возможность визуализировать форму колебаний для каждой собственной частоты, что позволяло безошибочно идентифицировать интересующие нас изгибные стоячие волны.

В таблице 2.1 представлены результаты сравнения собственных частот, полученных по данным физического (f_T^ϕ, f_u^ϕ) и компьютерного (f_T^κ, f_u^κ) моделирования для изгибных колебаний по толщине и по ширине образца, соответственно. Из таблицы видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются с данными численного моделирования, особенно для изгибных

колебаний по ширине образца. Почти для всех мод частоты, определенные экспериментально, отличаются от рассчитанных методом конечных элементов не более, чем на 2%, а среднее отклонение составило 1.1%. При этом отличия имеют регулярный характер – экспериментально определенные частоты, как правило, несколько больше расчетных.

Таблица 2.1 - Сравнение собственных частот, определенных с помощью физического ($f_t^\phi, f_{ш}^\phi$) и компьютерного ($f_t^k, f_{ш}^k$) моделирования для изгибных колебаний по толщине и по ширине незакрепленной балки, соответственно

№ моды	f_t^k , кГц	f_t^ϕ , кГц	f_t^ϕ / f_t^k	$f_{ш}^k$, кГц	$f_{ш}^\phi$, кГц	$f_{ш}^\phi / f_{ш}^k$
2	0.914	0.93	1.018	1.643	1.63	0.992
3	1.692	1.71	1.011	3.23	3.27	1.012
4	2.638	2.69	1.02	4.75	4.79	1.008
5	3.68	3.76	1.022	6.31	6.4	1.014
6	4.94	4.98	1.008	7.93	8.01	1.01
7	6.132	6.15	1.003	9.55	9.62	1.007
8	7.65	7.52	0.983	10.99	11.04	1.005
9	8.801	8.89	1.01	12.833	12.84	1.001

Это может быть связано как с неточным определением физических свойств материала образца, его неоднородностью и неидеальной геометрической формой, так и с вычислительными погрешностями. Нужно также отметить, что несмотря на однозначное определение частот экспериментальных пиков, обусловленное высокой добротностью бетона, точность такого определения ограничена дискретностью спектров. В нашем случае спектральная разрешающая способность составляла примерно 12 Гц, поэтому точность измерения собственных частот составляла от 0.1% до примерно 1.5%, в зависимости от номера моды.

По приведенным в таблице 2.1 значениям частот восьми мод можно, воспользовавшись формулой (1.1), оценить геометрическую дисперсию скорости изгибных волн в данной модели балки. Для изгибных колебаний по толщине скорость изменяется примерно от 465 до 990 м/с в диапазоне 0.93–8.89 кГц, а для колебаний по ширине – от 815 до 1425 м/с в диапазоне 1.63–12.84 кГц.

кГц. Это изменение меньше, чем предсказывает теория упругости [Стрелков, 1964] для тонких по сравнению с длиной волны стержней (для которых скорость пропорциональна квадратному корню из частоты), так как при выбранной геометрии модели балки она не может считаться тонкой для частот, на которых формируются стоячие волны.

Таким образом, сравнение результатов физического и численного моделирования показало, что метод выделения стоячих волн из шумового поля, первоначально разработанный для обследования крупных инженерных сооружений, может с успехом применяться в лабораторных экспериментах, в том числе с целью поиска критериев для диагностирования дефектов по стоячим волнам, формирующимся в различных объектах под действием акустического шума.

2.3. Влияние продольных щелевидных дефектов на изгибные стоячие волны в балке прямоугольного сечения с закрепленными концами

Эксперименты, направленные на исследование возможностей диагностирования дефектов балок с использованием стоячих волн, проводились и ранее (например, [Chondros et al., 2001; Nahvi and Jabbari, 2005; El-Ouafi Bahlous et al., 2009; Jena et al., 2012]). Для возбуждения колебаний в исследуемых образцах применялись, как правило, импульсные или вибрационные искусственные источники. В данном разделе приведены результаты экспериментов с шумовым источником, проведенных по описанной выше методике на моделях закрепленной балки с продольными щелевидными дефектами.

Вначале были проведены предварительные эксперименты на модели незакрепленной балки с размерами $3.5 \times 7 \times 50$ см³, с торца которой на глубину 6 см пропиливались щелевидные прорези шириной 3 мм разной ориентации. Хотя таким моделям трудно сопоставить какие-либо реальные объекты, они

просты в изготовлении и при этом позволяют оценить характер влияния ориентации щелей на частоты изгибных мод.

Эксперименты показали, что прорезы, сделанные в среднем сечении балки параллельно наибольшим по площади граням, понижают ее собственные частоты при изгибных колебаниях по толщине и повышают их при колебаниях по ширине (схематическое изображение колебаний по толщине и ширине показано на рисунке 2.5). Прорезы параллельные средним граням балки, наоборот, повышают ее собственные частоты при изгибе по толщине и понижают их при изгибе по ширине. То есть нарушение продольной трещиной сплошности даже части балки, сопровождающееся уменьшением ее эффективной толщины, приводит к повышению частот стоячих волн при изгибе балки «в плоскости трещины» и к уменьшению таких частот при ее изгибе в перпендикулярном направлении. Этот эффект может быть использован для оценки ориентации плоскости предполагаемой трещины в исследуемом объекте.

В основной серии экспериментов исследовались собственные частоты балки прямоугольного сечения с закрепленными торцевыми гранями, которую можно рассматривать как модель несущих элементов различных сооружений. Для фиксации торцевых граней балки с теми же поперечными размерами (3.5×7 см²) ее концы были зацементированы в два блока кубической формы (рисунок 2.9а) из такого же бетона, при этом масса каждого блока превышала массу балки примерно в 20 раз.

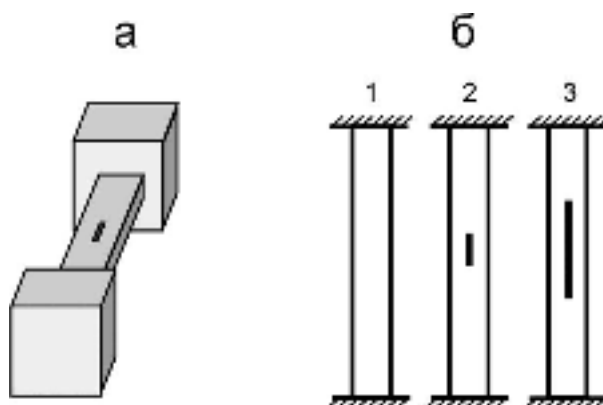


Рисунок 2.9 - Схема крепления балки (а) и виды ее моделей (б)

Длина свободной (незацементированной) части балки составляла 49.5 см. На рисунке 2.9б схематически изображены виды исследованных моделей. Эксперименты были проведены как с монолитной закрепленной балкой (модель 1), так и с балками, в центральной части которых перпендикулярно наибольшим граням образца были пропилены сквозные продольные щели шириной 4 – 5 мм и длиной 6 и 18 см (модели 2 и 3). В дальнейшем условно будем называть такие дефекты щелями по толщине балки.

В таблицах 2.2 и 2.3 приведены результаты сравнения нескольких собственных частот, полученных экспериментально и рассчитанных методом конечных элементов для монолитной балки и балки со щелью длиной 6 см. Как можно видеть из таблиц, согласие экспериментальных и расчетных частот здесь несколько хуже, чем для незакрепленной балки, особенно для балки с щелью, где различия для отдельных мод достигают 20%. Это может быть связано с недостаточно качественным разрезом в физической модели балки и изменениями свойств бетона при механической обработке. Тем не менее на качественном уровне экспериментальные и расчетные собственные частоты согласуются вполне удовлетворительно.

Таблица 2.2 - Сравнение собственных частот, определенных с помощью физического ($f_t^\Phi, f_{ш}^\Phi$) и компьютерного ($f_t^K, f_{ш}^K$) моделирования для изгибных колебаний по толщине и по ширине закрепленной монолитной балки, соответственно

№ моды	f_t^K , кГц	f_t^Φ , кГц	f_t^Φ / f_t^K	$f_{ш}^K$, кГц	$f_{ш}^\Phi$, кГц	$f_{ш}^\Phi / f_{ш}^K$
2	0.76	0.78	1.026	1.38	1.47	1.065
3	1.39	1.46	1.05	2.43	2.64	1.086
4	2.17	2.25	1.037	3.47	3.81	1.098
5	3.18	3.32	1.044	5.01	5.13	1.024
6	4.14	4.44	1.072	6.23	6.49	1.042

Таблица 2.3 - Сравнение собственных частот, определенных с помощью физического ($f_t^\phi, f_{ш}^\phi$) и компьютерного ($f_t^k, f_{ш}^k$) моделирования для изгибных колебаний по толщине и по ширине закрепленной балки с щелью длиной 6 см, соответственно

№ моды	f_t^k , кГц	f_t^ϕ , кГц	f_t^ϕ / f_t^k	$f_{ш}^k$, кГц	$f_{ш}^\phi$, кГц	$f_{ш}^\phi / f_{ш}^k$
2	0.97	1.17	1.206	1.19	0.98	0.824
3	1.93	1.86	0.964	2.21	1.95	0.882
4	2.88	2.93	1.017	2.98	2.83	0.95
5	4.13	4.1	0.993	4.64	4.1	0.884
6	5.56	5.47	0.984	5.66	5.57	0.984

Наглядно влияние продольных щелей, расположенных в центральной части балки, на экспериментально определенные частоты мод изгибных стоячих волн иллюстрирует рисунок 2.10. Как можно видеть, щели оказывают значительное влияние на собственные частоты изгибных колебаний. Если в монолитном образце, как и следовало ожидать, собственные частоты при изгибе по толщине значительно ниже частот при изгибе по ширине, то уже относительно небольшая щель длиной 6 см приводит к тому, что значения собственных частот для этих двух видов колебаний становятся сопоставимыми. В модели с щелью длиной 18 см собственные частоты изгибных колебаний по толщине становятся уже существенно выше частот колебаний по ширине балки.

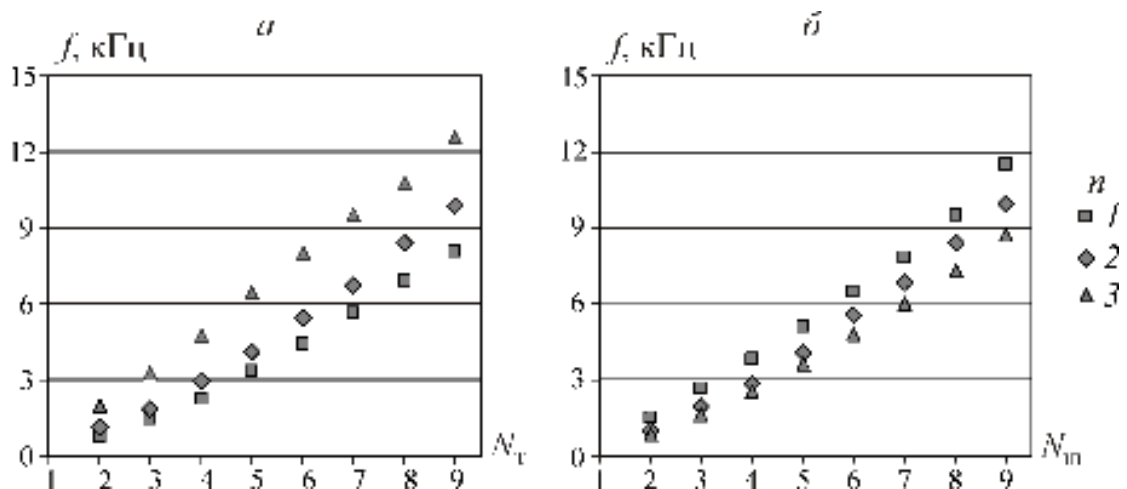


Рисунок 2.10 - Собственные частоты восьми мод изгибных стоячих волн по толщине (а) и по ширине (б) балки для трех моделей. N_t и $N_{ш}$ – номера мод изгибных колебаний по толщине и ширине, соответственно, f – частота, n – номер модели (см. рис. 2.9б)

На рисунке 2.11 показаны относительные отклонения Δf частот восьми изгибных мод для моделей со щелями относительно одноименных частот монолитного образца:

$$\Delta f = (f_N - f_{N0}) / f_{N0} \cdot 100\%,$$

где f_N – частота N -ой моды для модели с щелью, f_{N0} – то же для монолитного образца.

Анализ экспериментальных данных показал, что, во-первых, наличие дефектов данного вида приводит к разнонаправленному изменению собственных частот изгибных колебаний по толщине и по ширине балки: если собственные частоты при изгибе балки по толщине повышаются, то при изгибе по ширине они понижаются (рисунок 2.10–2.11). На качественном уровне это согласуется с описанными в начале этого раздела результатами для незакрепленной балки с щелевидными разрезами в ее торцевой части. Во-вторых, как и следовало ожидать, увеличение длины продольной щели приводит к более значительным изменениям собственных частот, особенно для изгибных колебаний по толщине.

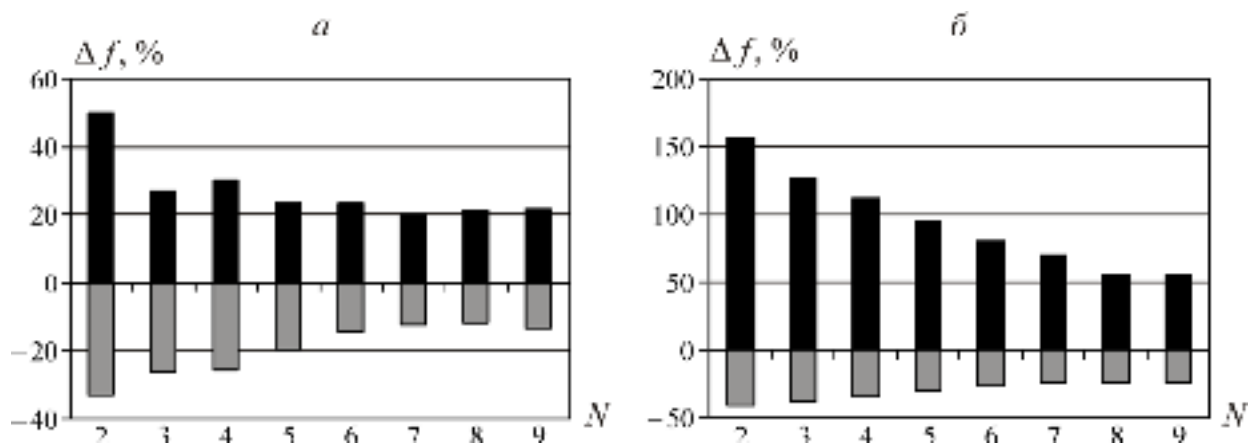


Рисунок 2.11 - Относительное изменение собственных частот Δf восьми мод изгибных стоячих волн по толщине (черные столбцы) и по ширине (серые столбцы) для моделей с щелью длиной 6 см (а) и 18 см (б) в сравнении с монолитной балкой.

N – номер моды изгибных колебаний

Кроме того, как можно видеть, наиболее сильно изменяются частоты низших изгибных мод. Интересно отметить, что если для длинной щели

относительное изменение частот с увеличением номера моды уменьшается монотонно (рисунок 2.11б), то для короткой щели при общей тенденции к уменьшению наблюдаются некоторые осцилляции этого параметра по четным и нечетным модам, в особенности для низших мод (рисунок 2.11а). Возможно, это связано с тем, что относительно короткая щель длиной 6 см влияет в основном на небольшой объем балки, попадающий в окрестность либо центрального узла для низших четных мод, либо центральной пучности для низших нечетных мод. Более протяженная щель длиной 18 см, перекрывая как «неподвижные» узловые точки, так и участки в окрестности пучностей, оказывает некоторое сглаживающее действие на характер изменения собственных частот от моды к моде.

Таблица 2.4 - Сравнение собственных частот f_t^k и $f_{ш}^k$, определенных с помощью компьютерного моделирования для изгибных колебаний закрепленных балок по толщине и по ширине, соответственно

№ моды	Монолит		Щель 6 см по толщине		Щель 6 см по ширине	
	f_t^k , кГц	$f_{ш}^k$, кГц	f_t^k , кГц	$f_{ш}^k$, кГц	f_t^k , кГц	$f_{ш}^k$, кГц
2	0.76	1.38	0.97	1.19	0.66	1.58
3	1.39	2.43	1.93	2.21	1.23	2.66
4	2.17	3.47	2.88	2.98	1.98	3.74
5	3.18	5.01	4.13	4.64	2.89	5.27
6	4.14	6.23	5.56	5.66	3.95	6.56

Эксперименты на моделях с аналогичными щелевыми дефектами, но ориентированными уже не перпендикулярно, а параллельно наибольшим граням балки (условно назовем их щелями по ширине) не проводились из-за технических проблем, связанных с изготовлением в узкой балке прорезей такой ориентации. Тем не менее, компьютерное моделирование методом конечных элементов подтверждает, что и для таких дефектов тенденция в изменении собственных частот сохраняется (см. таблицу 2.4). А именно, продольная щель разнонаправленно изменяет частоты изгибных стоячих волн в балке при колебаниях параллельно или перпендикулярно плоскости щели: повышает в

первом и понижает во втором случае. Эта особенность может служить диагностическим признаком при дефектоскопии конструктивных элементов такого рода.

Нужно отметить, что наличие щелевидных дефектов приводило, как правило, к появлению дополнительных мод, связанных с колебаниями отдельных частей балки. Чаще всего они имели относительно низкую амплитуду, но в некоторых случаях их присутствие затрудняло идентификацию основных мод. Например, это наблюдалось в экспериментах с некоторыми другими видами щелевых дефектов, результаты которых в данной работе не приводятся, так как надежно в них выделялось не все семейство изгибных волн в исследованном частотном диапазоне, а лишь некоторые отдельные моды. Тем не менее, по результатам этих экспериментов можно констатировать, что для щели, расположенной в центральной части балки, эффект сдвига частот выражен намного сильнее, чем для щели той же длины, смещенной к ее краю, особенно для изгибных колебаний по толщине.

Таким образом, исходя из результатов проведенных экспериментов, можно констатировать, что в килогерцовом диапазоне частот из шумового поля можно уверенно выделить формирующиеся под его воздействием в ограниченных телах стоячие волны, которые могут быть использованы для диагностирования, а при повторяющихся наблюдениях и для мониторинга состояния исследуемых объектов.

Выводы по главе

1. Разработана методика физического моделирования стоячих волн, формирующихся в ограниченных телах в результате воздействия сейсмоакустических шумов.
2. Результаты физического моделирования показали возможность выделения стоячих волн из шумового поля в килогерцовом диапазоне, что может быть использовано для обследования относительно небольших объектов,

например, различных конструктивных элементов сооружений. Эффективный инструмент для такого выделения при работе с малоканальной аппаратурой – пересчет разновременных данных к «единому» времени.

3. Определенные по шумовым данным собственные частоты модельных объектов хорошо согласуются с частотами, рассчитанными для таких объектов методом конечных элементов.
4. На примере простых моделей показана принципиальная возможность применения выделяемых из шумового поля стоячих волн для диагностирования и мониторинга различных объектов на предмет выявления и идентификации возникающих в них дефектов.
5. Продольная щель разнонаправленно изменяет частоты изгибных стоячих волн в балке при колебаниях параллельно или перпендикулярно плоскости щели: повышает в первом и понижает во втором случае.

ГЛАВА 3.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБНЫХ СТОЯЧИХ ВОЛН В НАДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Трубопроводы широко применяются при обустройстве и эксплуатации месторождений полезных ископаемых. На предприятиях, связанных с разработкой твердых полезных ископаемых, различные виды трубопроводов используются в системах вентиляции и пожаротушения, в качестве гидро- и пневмотранспорта для перемещения полезных ископаемых, отходов их обогащения, породы для закладки выработанного пространства и т.д. В нефтегазовом комплексе трубопроводный транспорт вообще является одним из важнейших элементов, без нормального функционирования которого развитие этой отрасли народного хозяйства невозможно.

Значительная часть трубопроводов сооружается в надземном исполнении – на опорах или эстакадах, обеспечивающих некоторый зазор между трубой и грунтом. В таких трубопроводах создаются благоприятные условия для формирования стоячих волн в пролетах трубы между соседними креплениями, которые характеризуются набором собственных частот, зависящих от длины пролетов, материала и диаметра трубы, толщины ее стенок и др.

При определенных условиях на этих частотах могут возникать резонансы, повышающие вероятность повреждения участка трубопровода. К возникновению резонансов могут приводить как природные (ветровая нагрузка, осадки, сейсмические воздействия и т.д.), так и техногенные (движение транспорта, различные технологические процессы, воздействие на трубу потока транспортируемого вещества и др.) факторы. Особенно опасны низкочастотные резонансы, вызываемые мощными периодическими или квазипериодическими воздействиями, например динамическими нагрузками от вращающихся неуравновешенных роторов насосов и турбоагрегатов.

Частичная или полная потеря устойчивости опор трубопровода, например, вследствие выпучивания или просадки грунта под ними, приводят,

наряду с возрастанием изгибных напряжений в трубах, к фактическому увеличению длины пролетов и, как следствие, к понижению их собственных частот. Это еще больше увеличивает опасность возникновения низкочастотных резонансов, которые могут привести к повреждению или даже разрушению участка трубы [Методические..., 1997].

Документами, регламентирующими строительство и эксплуатацию трубопроводов, предусмотрено проведение расчетов их собственных частот и форм колебаний для оценки вибропрочности и возможных путей отстройки от детерминированных частот возмущения [Указания..., 1994]. Методам таких расчетов при разных условиях закрепления участков трубы посвящено большое число работ (отметим лишь некоторые недавно опубликованные [Lee and Oh, 2003; Tong et al., 2007; Нестеров и др., 2009; Huang et al., 2010; Акуленко и др., 2011; Березнев, 2011; Li et al., 2011; Zhai et al., 2011; Mathan and Siva Prasad, 2012]). В то же время стандартные методы инструментального контроля трубопроводных систем, данные которых можно было бы сравнивать с расчетами, не ориентированы на определение собственных частот и форм колебаний [Указания..., 1994; Харионовский, 1998].

В лабораторных экспериментах исследование влияния различных факторов на динамические характеристики трубопроводов, в том числе на собственные частоты и формы колебаний, обычно проводят, возбуждая в их моделях или отдельных элементах колебания с помощью искусственных источников. Такими источниками могут быть ударные воздействия [Li et al., 1990; Прокофьев, 1999; Salley and Pan, 2002; Tijsseling and Vardy, 2005; Semke et al., 2006], осциллирующие механические колебания [Li et al., 1990; Комаров и др., 2002; Bu et al., 2007], резкое изменение давления в трубе [Mao et al., 2006; Xie et al., 2012] и др. Однако для изучения колебаний трубопроводов *in situ*, и, тем более, для создания систем их мониторинга применение искусственных источников во многих случаях затруднено или даже невозможно.

В данной главе на результатах физического моделирования иллюстрируется возможность оценки собственных частот и форм колебаний

участков трубопроводов по зарегистрированным на поверхности трубы акустическим шумам [Колесников и др., 2012^{1,3,4}; Федин и Каргаполов, 2012³; Kolesnikov et al., 2012¹; Еманов и др., 2013; Федин, 2013]. Кроме того, показано, что анализ форм колебаний позволяет однозначно диагностировать потерю устойчивости любой из опор исследуемого участка трубопровода.

3.1. Методика экспериментов

Участок надземного трубопровода моделировался отрезком медной трубы длиной 2 м и диаметром 18 мм с толщиной стенки 1 мм, которая через каждые 50 см была жестко зафиксирована пятью хомутами на установленных на массивном основании подставках. В остальном методика экспериментов практически не отличалась от применявшейся при исследовании моделей балок. Схема эксперимента показана на рисунке 3.1.

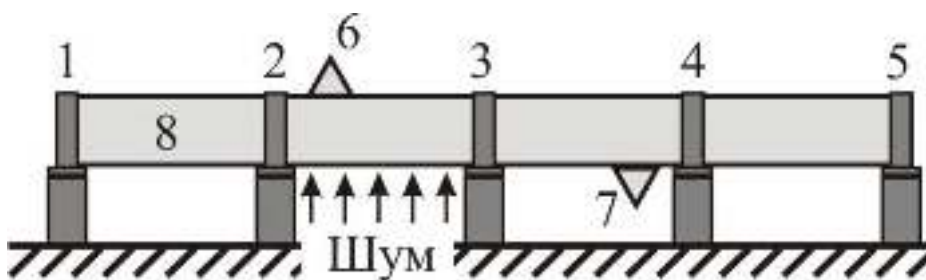


Рисунок 3.1 - Схема эксперимента: 1-5 – хомуты, 6 – передвигной и 7 – опорный ультразвуковые приемники, 8 – труба

Для сокращения времени экспериментов в модели создавалось дополнительное шумовое поле с помощью того же устройства, которое использовалось для генерации акустического шума в экспериментах с моделями балок (см. рисунок 2.2). Как и в тех экспериментах, для регистрации микросейсмических данных использовались двухканальный цифровой осциллограф В-423 и широкополосные датчики, изготовленные на основе пьезокерамических дисков диаметром 2 мм и толщиной 1 мм.

В ходе экспериментов один датчик использовался как опорный и жестко крепился на нижней образующей трубы, второй датчик последовательно передвигался с шагом 1 см по профилю наблюдений вдоль верхней образующей. Профиль наблюдений длиной 50 см располагался между вторым и третьим хомутами, а опорный датчик – в соседнем пролете модели (рисунок 3.1). Оси максимальной чувствительности датчиков были ориентированы по отношению к трубе в ее радиальном направлении. После установки передвижного датчика в каждой точке профиля производилась синхронная цифровая запись шумовых сигналов от обоих датчиков. Длительность регистрации при каждом положении передвижного датчика составляла примерно 6.5 секунд при частоте дискретизации 100 кГц.

3.2. Обработка экспериментальных данных

Вначале была проведена оценка собственных частот участка трубы между вторым и третьим хомутами. Для этого по записям, зарегистрированным передвижным датчиком, был рассчитан осредненный по времени и по всем точкам профиля амплитудный спектр (рисунок 3.2). Осреднение по точкам наблюдения позволило нивелировать эффект исчезновения пиков отдельных мод стоячих волн в спектрах записей, зарегистрированных в точках вблизи узлов этих мод.

На спектре отчетливо выделяются семь пиков, соответствующих частотам первых семи мод изгибных стоячих волн в отрезке трубы длиной 50 см с закрепленными концами. Как и в экспериментах с моделями балок, наблюдается постепенное изменение интервалов между соседними пиками на спектре, что связано с геометрической дисперсией (зависимостью от частоты) скорости изгибных волн в протяженных объектах [Стрелков, 1964; Микер и Мейтцлер, 1966; Исакович, 1973]. Скорость изгибных волн, оцененная согласно формуле (1.1) по частотам выделенных в отрезке трубы мод стоячих волн, в

диапазоне 0.226–5.26 кГц меняется примерно от 226 до 751 м/с.

Экспериментально определенные по шумовым данным собственные частоты жестко закрепленного отрезка трубы были сопоставлены с результатами численного моделирования методом конечных элементов, проведенного с помощью программного комплекса MSC Nastran [Рычков, 2004].

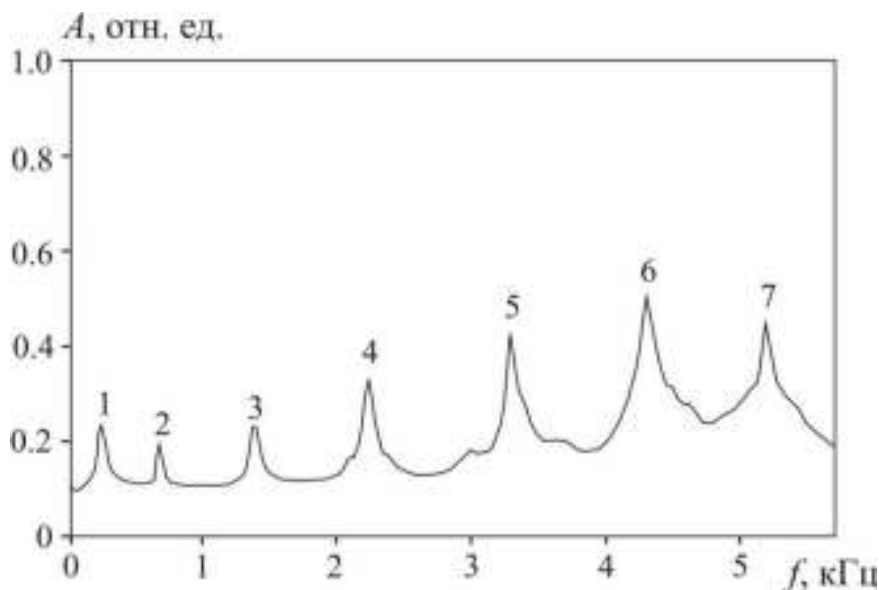


Рисунок 3.2 - Амплитудный спектр, осредненный по всем точкам наблюдений на профиле между соседними жесткими креплениями трубы: A – амплитуда, f – частота.

Цифрами отмечены пики первых семи мод изгибных стоячих волн

При моделировании использовались значения скоростей продольных $V_p = 4767$ м/с и поперечных $V_s = 2347$ м/с волн в меди, рассчитанные по известным из теории упругости формулам [Дортман, 1992]:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}},$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, ρ – плотность. Данные о модуле Юнга $E = 132$ ГПа, коэффициенте Пуассона $\nu = 0.34$ и плотности $\rho = 8.94$ г/см³ отожженной меди приведены на сайте производителя труб, фирмы Wieland Group, Германия (http://www.wieland.de/commonmedia/content/media/en/datenbltter/datenbltterw/K19_12.pdf). Шаг сетки при расчетах задавался равным 1 мм.

При численном моделировании рассчитывались резонансы закрепленного отрезка трубы при механическом воздействии со спектральными характеристиками типа белого шума. На рисунке 3.3 приведены нормированные амплитуды резонансов, рассчитанных методом конечных элементов, а в таблице 3.1 – результаты сравнения собственных частот, полученных по данным физического f^Φ и компьютерного f^K моделирования.

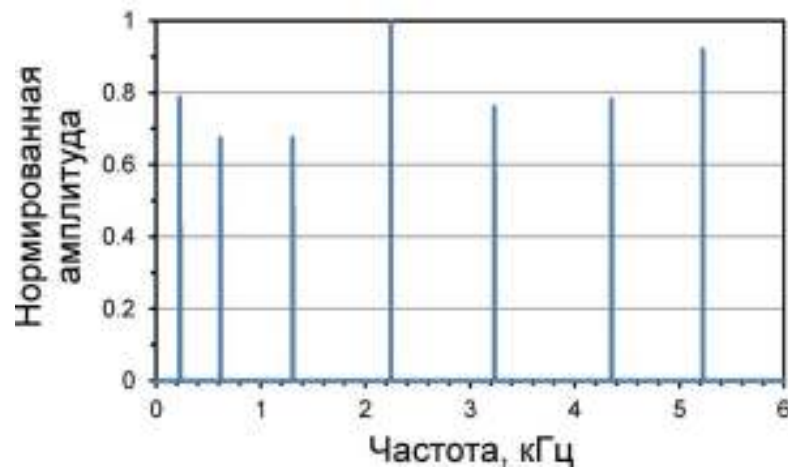


Рисунок 3.3 - Амплитуды резонансов закрепленного отрезка трубы, рассчитанные методом конечных элементов

Таблица. 3.1 - Сравнение собственных частот, определенных с помощью физического f^Φ и компьютерного f^K моделирования для изгибных колебаний стоячих волн на участке трубы с жестко закрепленными краями

№ моды	f^Φ , кГц	f^K , кГц	f^Φ / f^K
1	0.226	0.227	0.996
2	0.621	0.613	1.013
3	1.31	1.302	1.006
4	2.26	2.24	1.009
5	3.27	3.23	1.012
6	4.38	4.35	1.007
7	5.26	5.22	1.008

Из таблицы видно, что экспериментальные частоты хорошо согласуются с данными численного моделирования; различия составляют, как правило, менее одного процента. В то же время соотношения амплитуд отдельных мод

на экспериментальных и амплитудных спектрах отличаются, что связано с различным спектральным составом акустического шума в эксперименте и расчетах, влиянием частотных характеристик аппаратуры и т.д.

Определение форм колебаний по данным, полученным в разных точках трубы в разные периоды времени, осложнено тем, что шумовое поле в общем случае не является стационарным процессом. Даже для одной и той же точки разные реализации шумового воздействия могут существенно изменять соотношение между амплитудами спектральных составляющих зарегистрированных сигналов. Однако, как и в экспериментах с балками, наличие синхронных пар записей, полученных в передвижной и опорной точках наблюдений, позволяет решить эту проблему, используя описанный в разделе 1.4 алгоритм пересчета данных, зарегистрированных с помощью передвижного датчика в разные периоды времени (и, соответственно, при разных характеристиках шумового поля), к «единому» времени, что позволяет имитировать синхронную многоканальную запись для всего профиля. Дальнейшее суммирование спектров последовательных участков уже «синхронных» записей шумового поля для каждой точки наблюдений позволяет выделять когерентные колебания, связанные со стоячими волнами, на фоне некогерентного шума и таким образом определять как собственные частоты, так и формы колебаний обследуемого объекта.

Совместная визуализация амплитудных спектров, рассчитанных по такой методике для каждой передвижной точки после пересчета первичных данных к «единому» времени (рисунок 3.4), позволяет убедиться, что наблюдаемые на осредненном спектре (рисунок 3.2) пики соответствуют именно первым семи модам. Как можно видеть из рисунка, каждый номер моды совпадает с числом пучностей на соответствующей собственной частоте, то есть с числом полудлин изгибных волн, укладывающихся на профиле между местами жесткого крепления трубы. Для всех мод на краях рисунка наблюдаются минимумы амплитуд, что и следовало ожидать, так как это узловые точки, соответствующие местам крепления трубы.

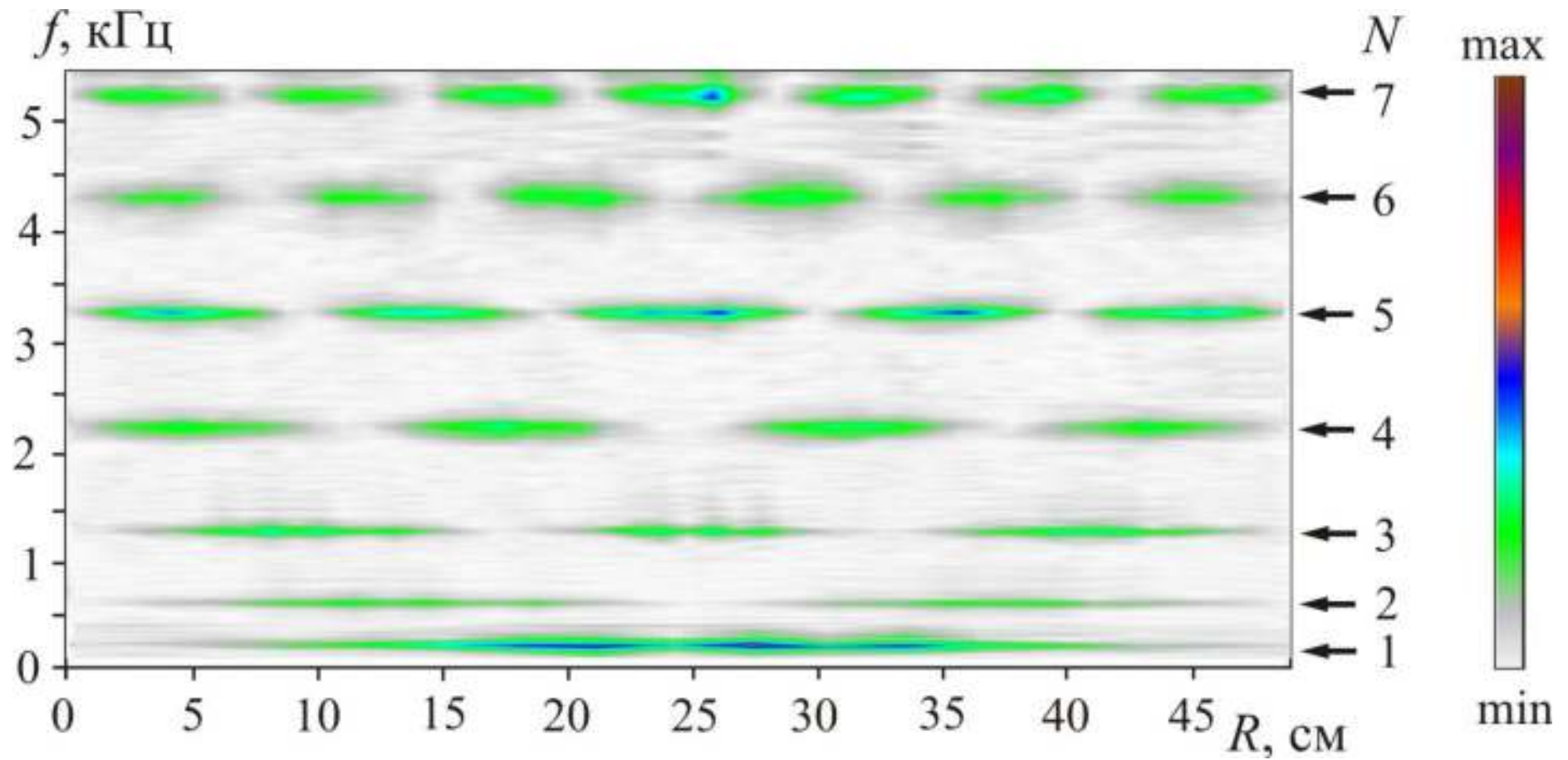


Рисунок 3.4 - Поле изгибных стоячих волн на участке трубы с жестко закрепленными краями (после пересчета к единому времени): f – частота, R – расстояние вдоль профиля, N – номер моды изгибных стоячих волн

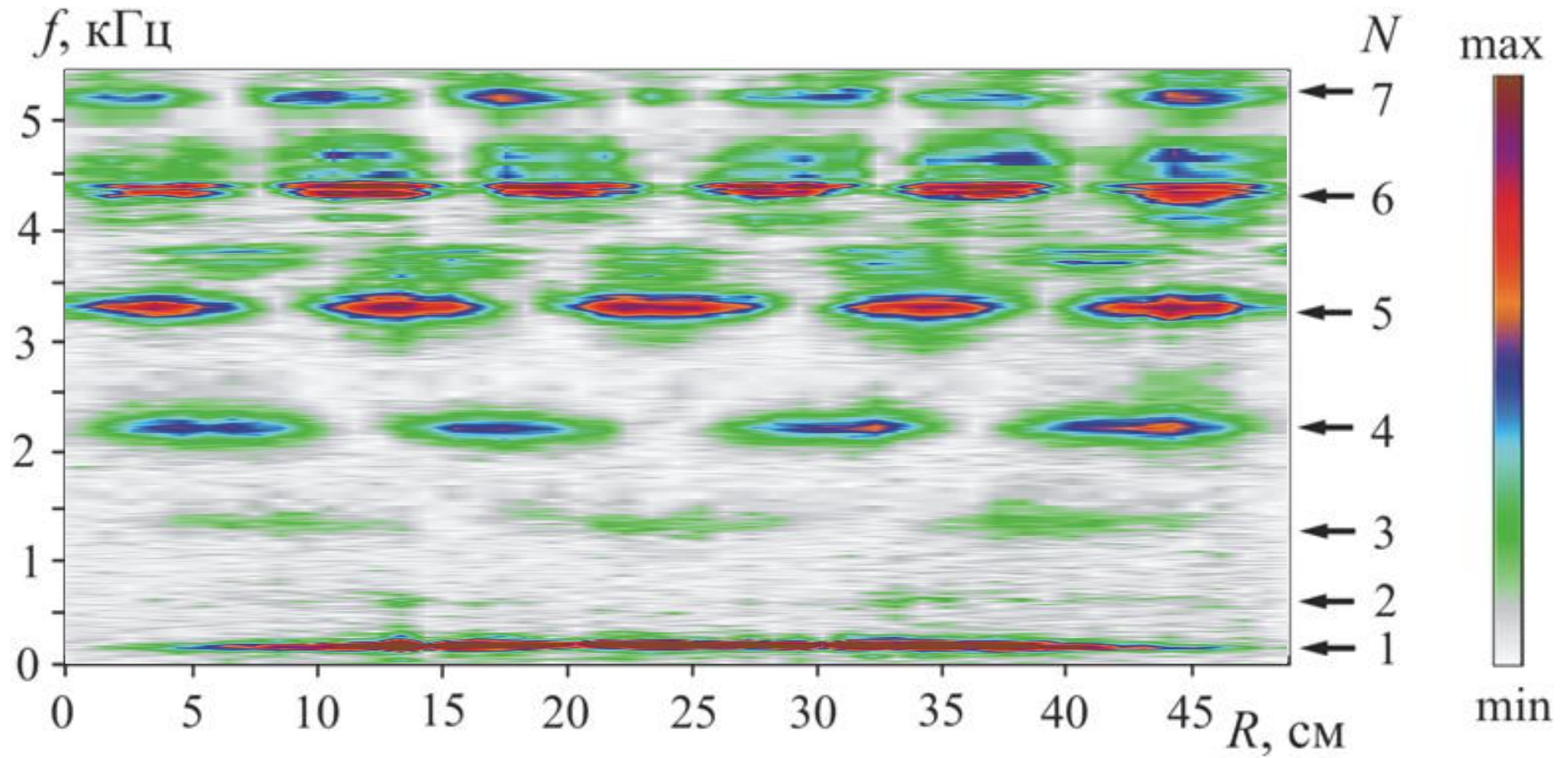


Рисунок 3.5 - Поле изгибных стоячих волн на участке трубы с жестко закрепленными краями (до пересчета к единому времени): f – частота, R – расстояние вдоль профиля, N – номер моды изгибных стоячих волн

Для сравнения на рисунке 3.5 приведено поле изгибных стоячих волн, полученное визуализацией спектров шумовых данных до их пересчета к «единому» времени. Как можно видеть, и в этом случае можно идентифицировать стоячие волны, хотя качество визуализации для отдельных мод здесь несколько хуже.

3.3. Моделирование частичной или полной потери устойчивости опоры пустой трубы

Частичная потеря устойчивости одной из опор пустого (заполненного газом) трубопровода имитировалась с помощью тонкой резиновой прокладки, подложенной на жесткое основание под хомут (третий хомут на рисунок 3.1) и трубу. Рисунок 3.6 показывает, как изменилось поле изгибных стоячих мод на том же профиле наблюдений (между вторым и третьим хомутами). Хотя низшую моду здесь выделить не удастся, отчетливо видно, что структура поля резко отличается от таковой для случая жесткого крепления всех опор (рисунок 3.4).

Количество мод изгибных колебаний в том же частотном диапазоне возросло примерно вдвое, из чего следует, что в данном случае колеблется как целое уже двойной пролет трубы. Снижение жесткости одного из креплений привело к тому, что в этом месте (соответствующем правому краю, рисунок 3.6) только для четных мод наблюдаются узловые точки, да и то лишь потому, что первоначальные пролеты имели одинаковую длину. Поэтому в образовавшемся двойном пролете, хотя и демпфированном в середине нежестким креплением, узловые точки четных мод приходятся как раз на середину пролета. Нечетные же моды двойного пролета в его середине имеют пучности. Еще одна интересная особенность – по сравнению с четными модами, для которых ослабленное крепление попадает в одну из узловых точек, нечетные амплитуды имеют более высокие амплитуды.

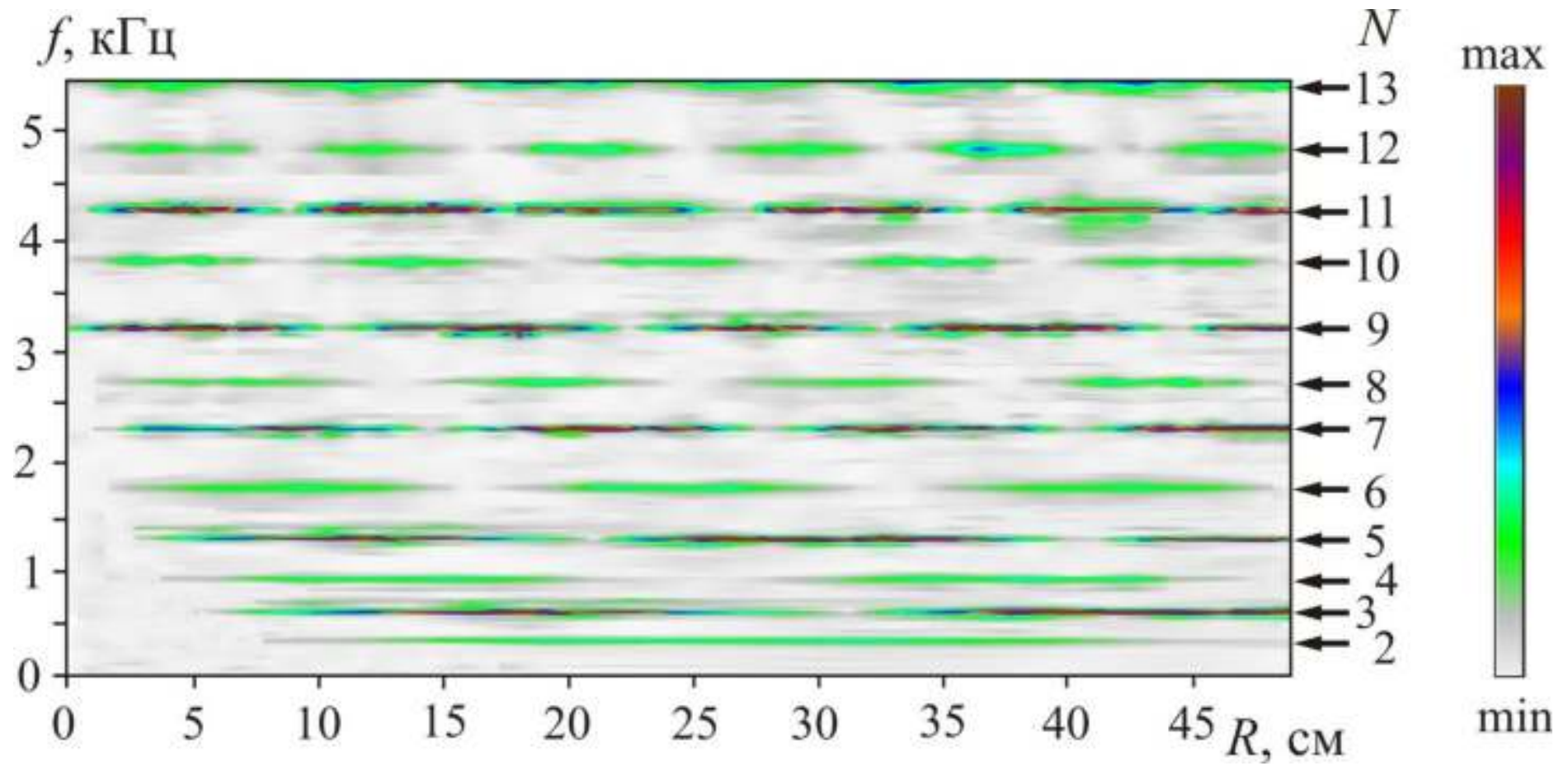


Рисунок 3.6 - Поле изгибных стоячих волн для того же, что и на рис. 3.4, участка трубы в случае пониженной жесткости правого крепления

Нужно также отметить, что моды с одинаковой полудлиной изгибной волны, которая определяется расстоянием между соседними узлами или соседними пучностями на профиле наблюдений, имеют несколько повышенные частоты в случае нежесткого крепления одного из хомутов в сравнении со случаем двух жестких креплений. Например, если четвертой моде на рисунке 3.4, имеющей четыре пучности на отрезке трубы 50 см, соответствует частота примерно 2.2 кГц, то восьмая мода на рисунке 3.6, имеющая то же число пучностей на том же отрезке, наблюдается на частоте около 2.7 кГц.

Более детально этот эффект иллюстрируется графиком (рисунок 3.7), на котором частоты шести низших мод жестко закрепленного одинарного пролета трубы обозначены ромбическими маркерами, а частоты шести низших **четных** мод двойного пролета, демпфированного посередине ослабленным креплением, – квадратными маркерами.

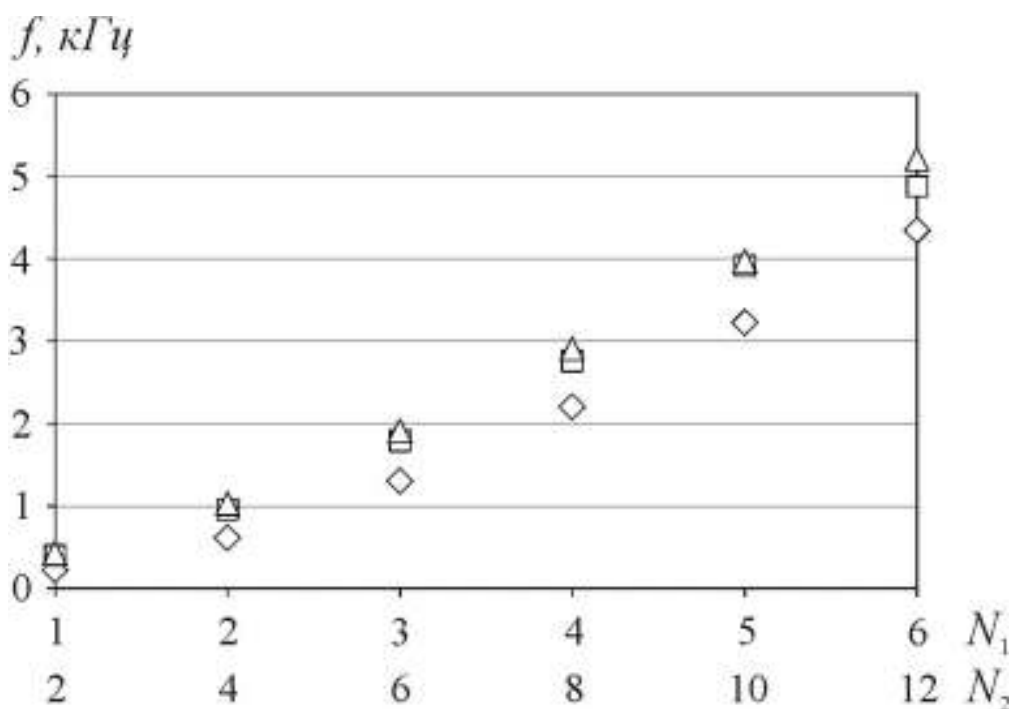


Рисунок 3.7 - Сравнение собственных частот для первых шести мод изгибных колебаний жестко закрепленного одинарного пролета трубы (номера мод N_1 , ромбические маркеры) и для первых шести **четных** мод изгибных колебаний пролета двойной длины (номера мод N_2 , квадратные маркеры – двойной пролет в средней точке демпфирован ослабленным креплением, треугольные маркеры – это крепление отсутствует)

Тот факт, что снижение жесткости крепления хомута, имитирующее частичную потерю устойчивости опоры трубопровода, фактически приводит к увеличению длины колеблющегося между жесткими опорами участка трубы, подтверждается экспериментом, в котором средняя опора (третий хомут на рисунок 3.1) была полностью удалена. Поле изгибных стоячих волн для этого случая приведено на рисунке 3.8. Как можно видеть, в целом картина подобна изображенной на рисунке 3.6, за исключением того, что частоты одноименных мод здесь несколько выше (см. рисунок 3.7, треугольные маркеры), а амплитуды четных и нечетных мод сопоставимы по величине.

Из результатов этих экспериментов также следует, что если бы первоначально соседние пролеты трубы имели разную длину, то потеря устойчивости разделяющей их опоры привела бы к исчезновению и других узлов в месте ее крепления к трубе (по крайней мере, части из них). В этом легко убедиться, если мысленно провести вертикальную прямую на рисунке 3.8, например, на отметке 45 см. Ни один узел выделенных на рисунке мод не попадет в окрестность этой прямой, хотя если бы в этом месте труба была жестко закреплена, все моды имели бы здесь узловые точки.

Также были проведены эксперименты с нежестким креплением двух соседних опор (с резиновыми прокладками под вторым и третьим хомутами на рисунке 3.1), а также при их отсутствии. Результаты здесь не приводятся, но можно отметить, что в этом случае, как и следовало ожидать, число мод в том же частотном диапазоне возрастает примерно в три раза в сравнении со случаем жесткого крепления всех хомутов, а в местах крепления второго и третьего хомутов узлы наблюдаются только у каждой третьей моды.

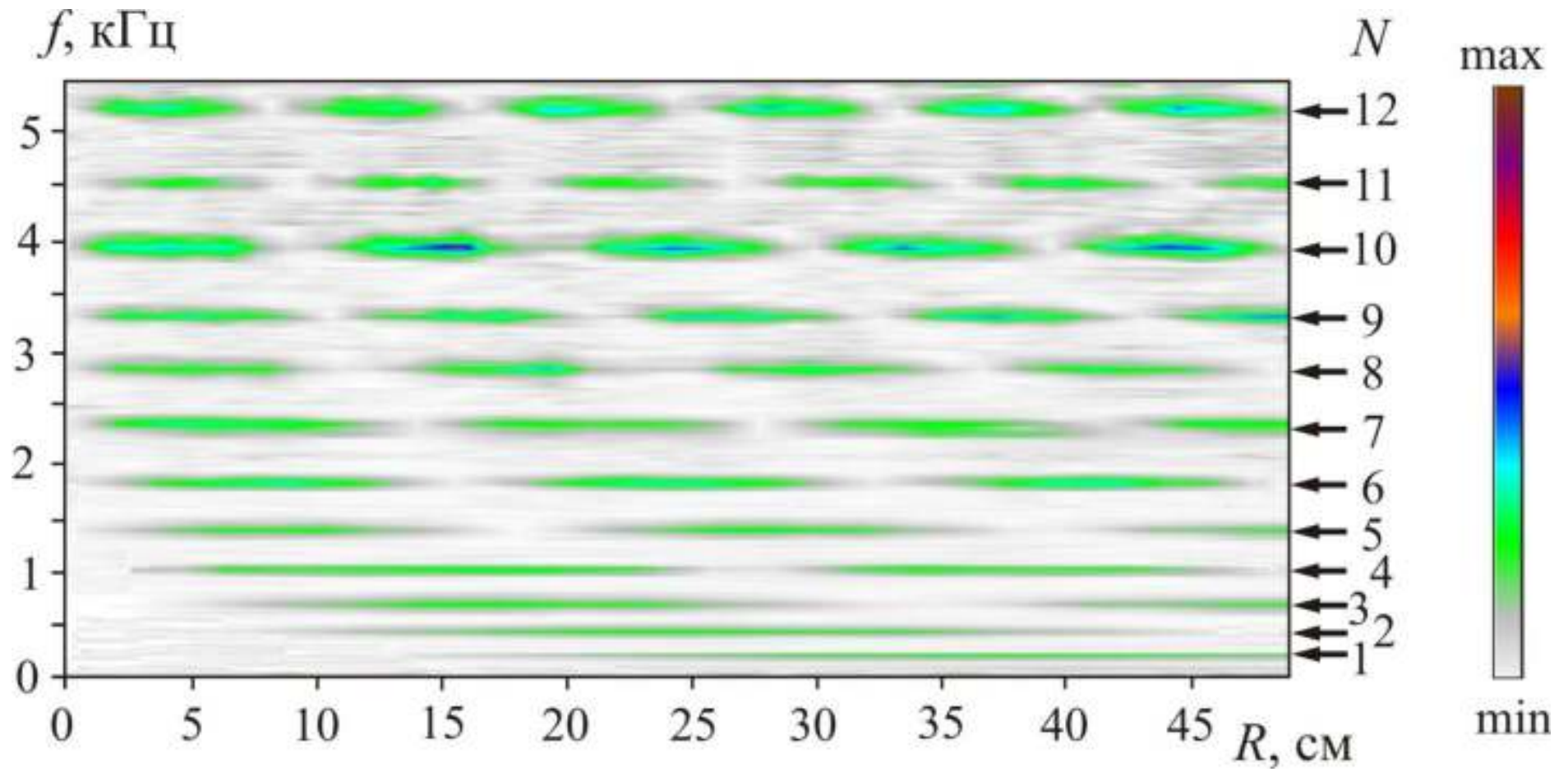


Рисунок 3.8 - Поле изгибных стоячих волн для того же, что и на рис. 3.3, участка трубы при отсутствии правого крепления

3.4. Моделирование частичной или полной потери устойчивости опоры трубы, заполненной жидкостью

В еще одной серии экспериментов участок надземного трубопровода моделировался полностью заполненным водой и герметизированным с торцов отрезком той же, что и в описанных выше экспериментах, медной трубы длиной 2 м и диаметром 18 мм с толщиной стенки 1 мм, который первоначально был жестко зафиксирован пятью стальными хомутами с шагом 50 см (см. схему эксперимента на рисунке 3.1). Методика экспериментов и обработка экспериментальных данных также были аналогичны таковым в экспериментах с пустой трубой.

Результаты обработки шумовых данных, полученных по описанной в предыдущем разделе методике, представлены на рисунке 3.9 в виде распределения амплитудных спектров вдоль профиля наблюдений между вторым и третьим хомутами. Как видно из рисунка, на амплитудных спектрах, полученных после обработки, здесь также происходит закономерное чередование максимумов и минимумов как по оси частот, так и вдоль профиля наблюдений.

Как и в случае пустой трубы, наблюдается характерная для стоячих волн картина, показывающая чередование их узлов и пучностей в пролете трубы между жесткими креплениями на собственных частотах, отмеченных на рисунке стрелками. Каждой из этих частот соответствует одна из мод поля стоячих волн, номер которой определяется числом пучностей на профиле между местами жесткого крепления трубы на соответствующей собственной частоте. Нужно заметить, что в сравнении с пустой трубой частоты низших мод для заполненной водой трубы несколько выше, а частоты мод более высоких порядков – наоборот ниже.

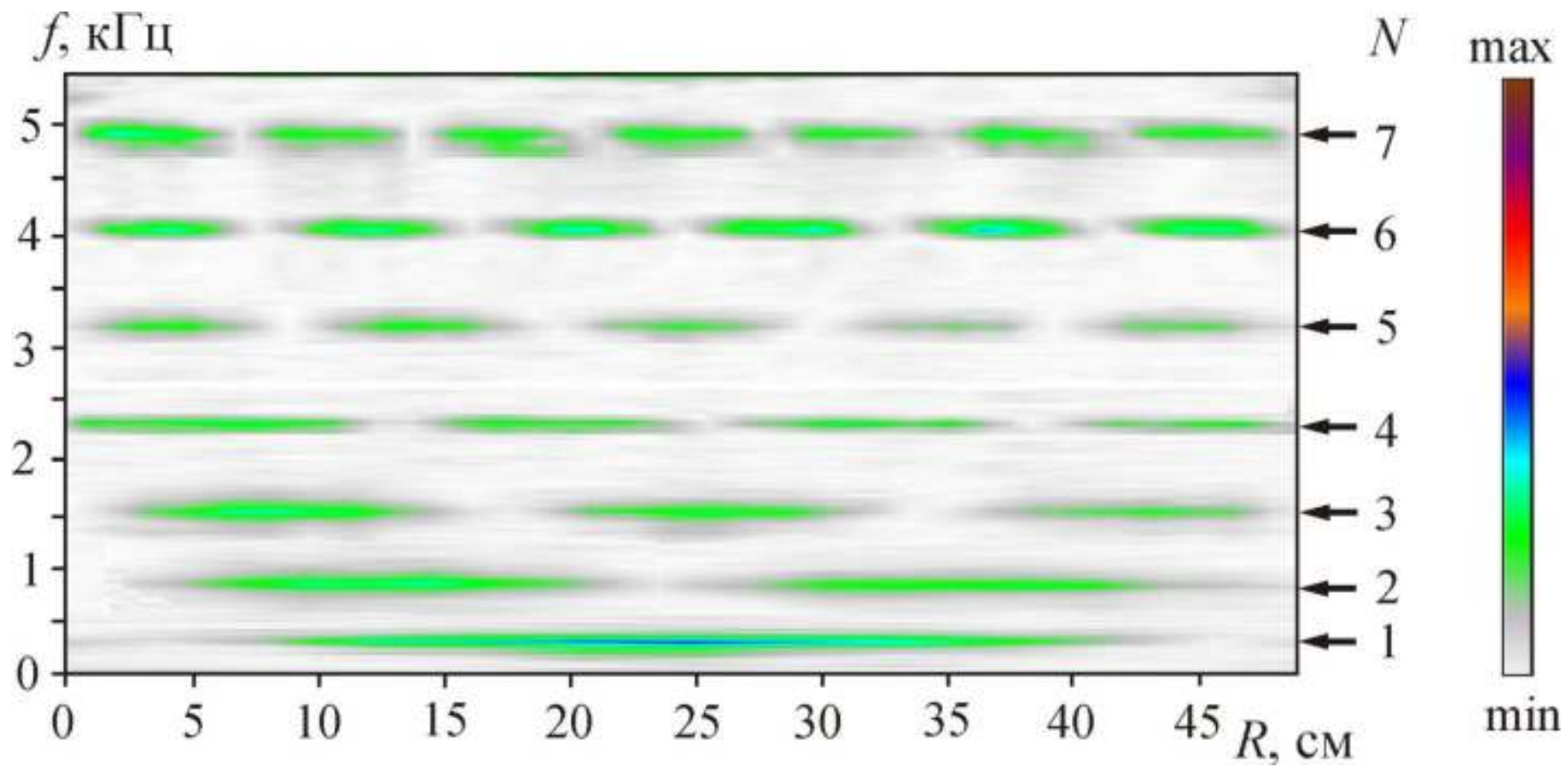


Рисунок 3.9 - Поле изгибных стоячих волн заполненной водой трубы на участке с жестко закрепленными краями: f – частота, R – расстояние вдоль профиля, N – номер моды изгибных стоячих волн

Для всех мод на краях рисунка наблюдаются минимумы амплитуд, так как это узловые точки, соответствующие местам жесткого крепления трубы. Сравнение с результатами численного моделирования методом конечных элементов, проведенного с помощью программного комплекса MSC Nastran [Рычков, 2004], показало, что мы вновь имеем дело с изгибными стоячими волнами. Различия между экспериментально определенными и полученными при численном моделировании собственными частотами первых семи изгибных мод здесь также составили порядка одного процента.

Для имитации частичной потери устойчивости одной из опор трубопровода под трубу и третий хомут (см. рисунок 3.1) вновь подкладывалась тонкая резиновая прокладка, а полная потеря устойчивости моделировалась удалением этой опоры. Рисунки 3.10 и 3.11 показывают, как при этом меняется поле изгибных стоячих волн на том же профиле наблюдений (между вторым и третьим хомутами). Хотя низшие моды здесь выделить не удастся, отчетливо видно, что структура поля на этих рисунках резко отличается от таковой для случая жесткого крепления всех опор (рисунок 3.9).

Влияние частичной или полной потери устойчивости опоры на поле стоячих волн в целом аналогично изменениям, наблюдавшимся в экспериментах с пустой трубой. Число мод изгибных колебаний в том же частотном диапазоне возрастает почти вдвое, что говорит о том, что в данном случае как целое колеблется уже двойной пролет трубы. Снижение жесткости или отсутствие одного из креплений приводит к тому, что в этом месте (соответствующем правому краю рисунков 3.10 и 3.11) только для четных мод наблюдаются узловые точки. Нечетные же моды в месте ослабленного или удаленного крепления, соответствующего середине двойного пролета, имеют пучности.

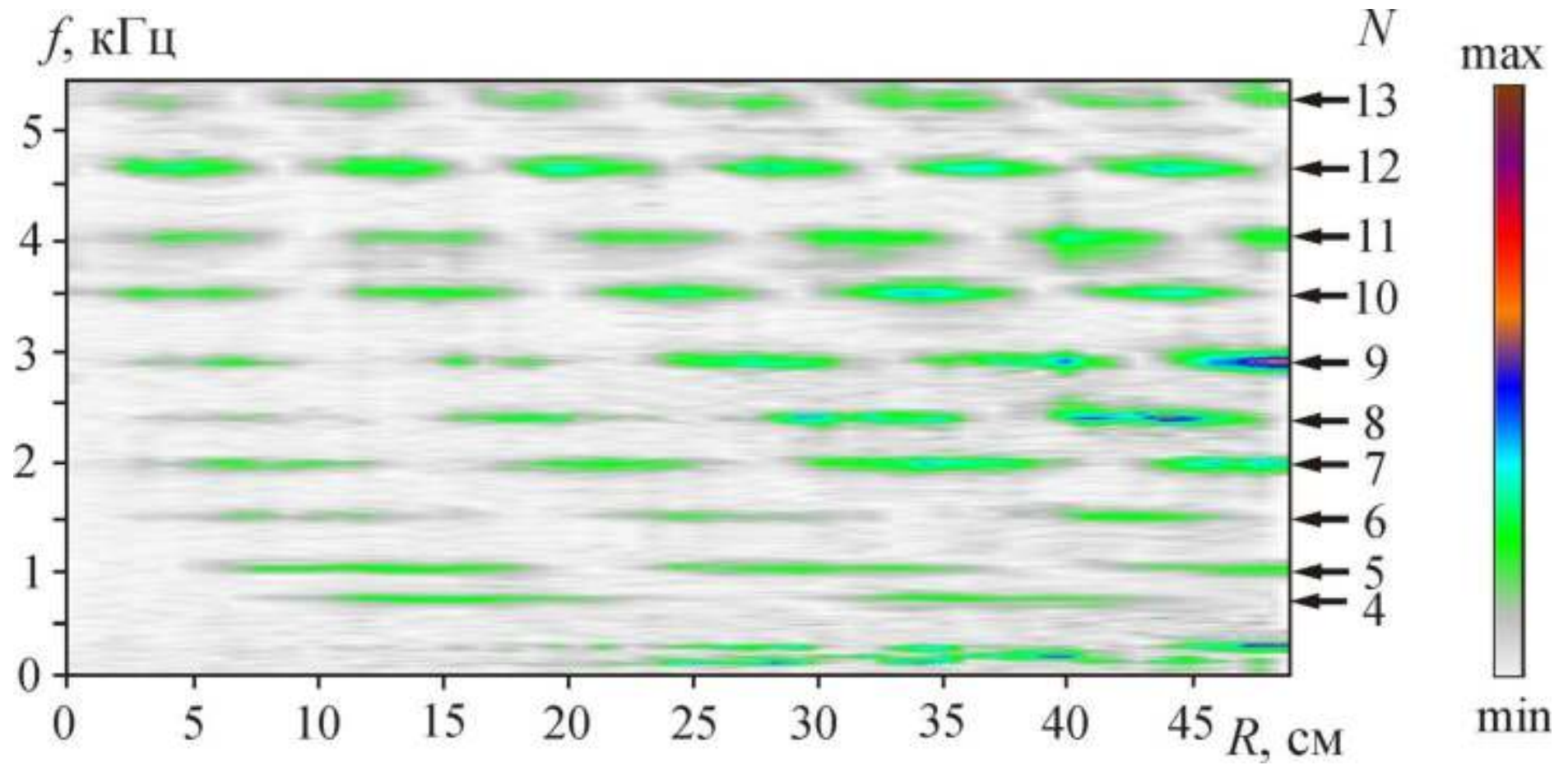


Рисунок 3.10 - Поле изгибных стоячих волн для того же, что на рис. 3.8, участка трубы, заполненной водой, при пониженной жесткости правого крепления

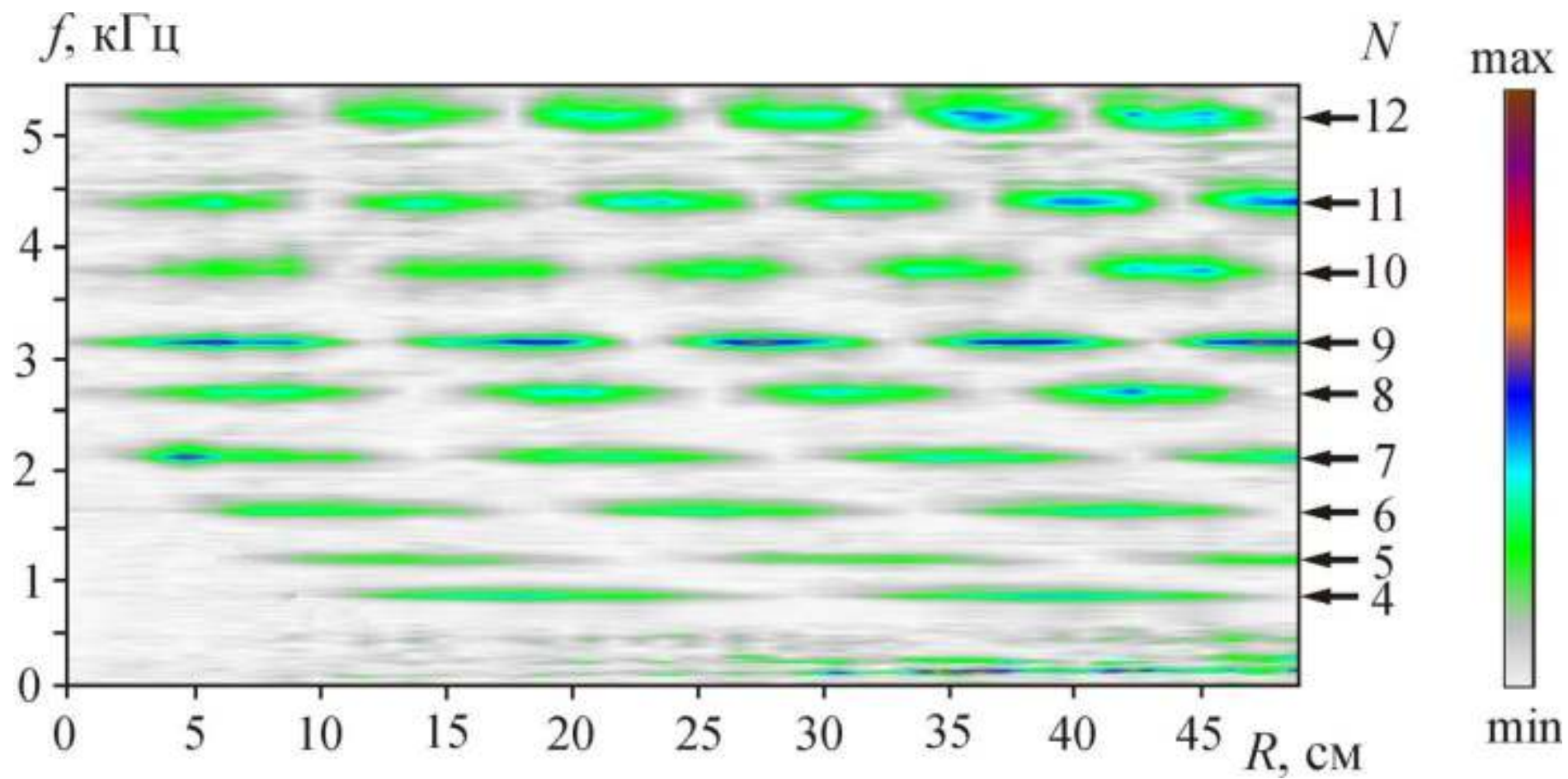


Рисунок 3.11 - Поле изгибных стоячих волн для того же, что на рис. 3.8, участка трубы при отсутствии правого крепления

Нужно также отметить, что моды с примерно одинаковой полудлиной изгибной волны, которая определяется расстоянием между соседними узлами или соседними пучностями на профиле наблюдений, имеют повышенные частоты в случае нежесткого крепления или отсутствия одного из хомутов в сравнении со случаем двух жестких креплений. Этот эффект, хотя в среднем и менее заметный, чем в случае пустой трубы, иллюстрируется графиком (рисунок 3.12), на котором частоты шести низших мод жестко закрепленного одинарного пролета трубы обозначены ромбическими маркерами, а частоты шести низших **четных** мод двойного пролета, демпфированного посередине ослабленным креплением – квадратными и для отсутствующего среднего крепления – треугольными маркерами.

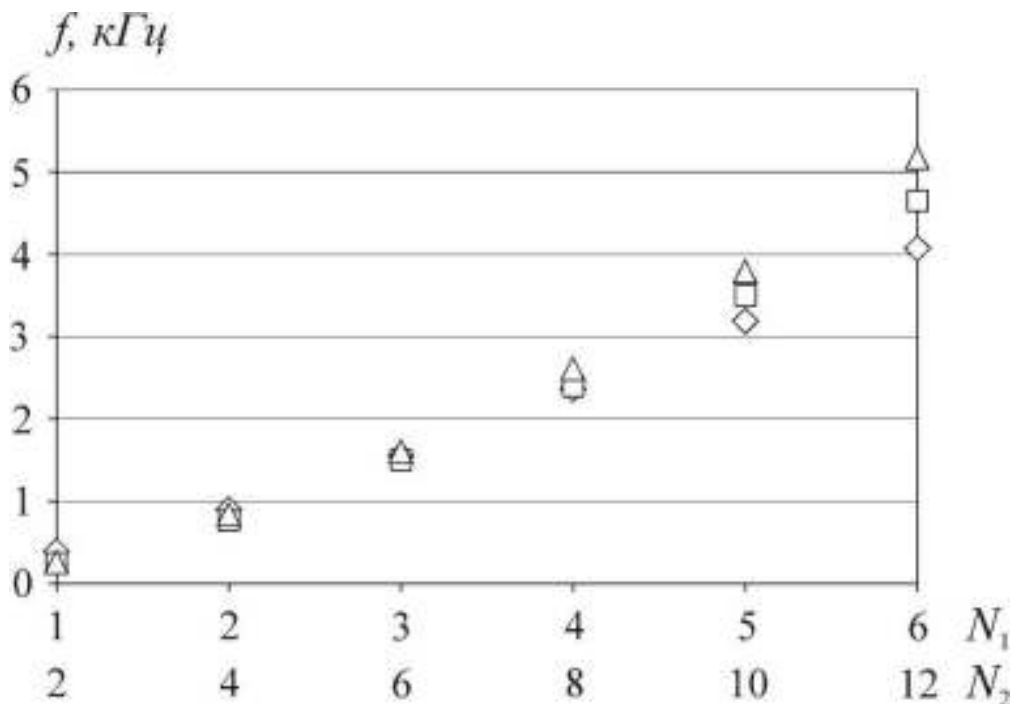


Рисунок 3.12 - Сравнение собственных частот для первых шести мод изгибных колебаний жестко закрепленного одинарного пролета трубы с водой (номера мод N_1 , ромбические маркеры) и для первых шести **четных** мод изгибных колебаний пролета двойной длины (номера мод N_2 , квадратные маркеры – двойной пролет в средней точке демпфирован ослабленным креплением, треугольные маркеры – это крепление отсутствует)

Наглядно характер изменения собственных частот f_1 изгибных колебаний жестко закрепленных по краям пролетов одинарной и двойной длины (50 и 100

см, соответственно) при заполнении трубы водой относительно собственных частот f_0 таких же пролетов пустой трубы иллюстрирует рисунок 3.13. Наблюдавшееся в экспериментах относительное изменение собственных частот для одинарного пролета на рисунке показано треугольными, а для двойного пролета – круглыми маркерами. Так же, как и на рисунках 3.7 и 3.12, приведены данные по первым шести модам для пролета одинарной длины и по первым шести **четным** модам для пролета двойной длины. Каждая пара соответствующих точек из этих двух наборов данных характеризуется примерно равными расстояниями между соседними узлами и пучностями на профиле наблюдений и близкими собственными частотами.

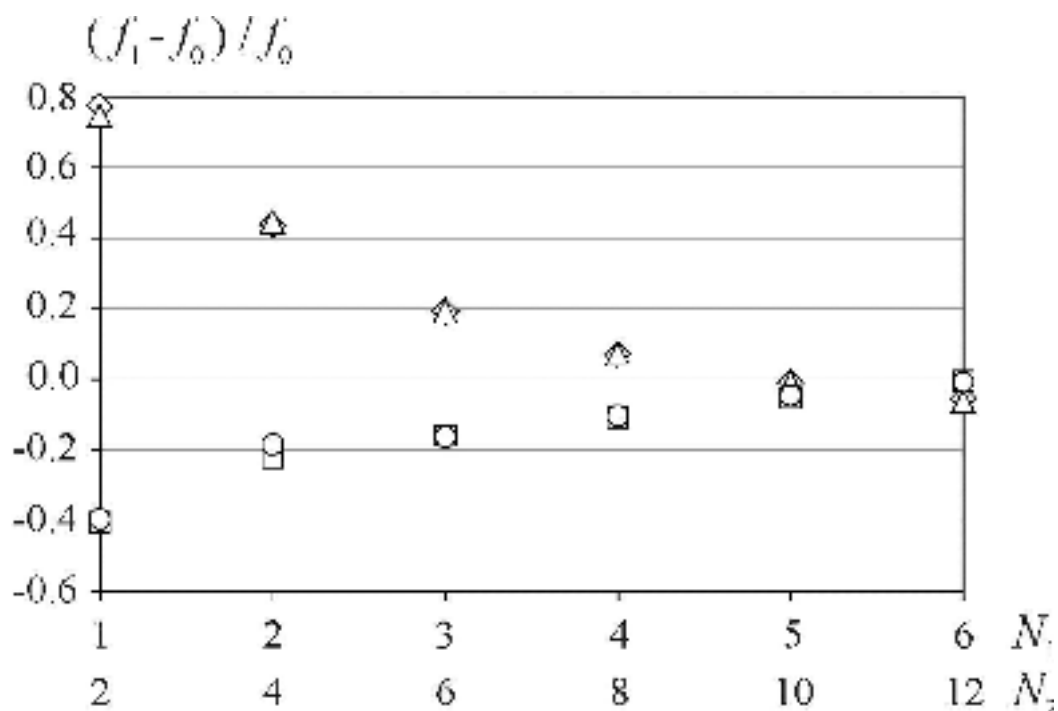


Рисунок 3.13 - Относительное изменение собственных частот при заполнении трубы водой для первых шести мод изгибных колебаний пролета трубы одинарной длины (номера мод N_1 , треугольные маркеры – эксперимент, ромбические – численные расчеты) и первых шести **четных** мод пролета двойной длины (номера мод N_2 , круговые маркеры – эксперимент, квадратные – численные расчеты)

Обращает на себя внимание разный характер изменения собственных частот при заполнении трубы водой для пролетов одинарной и двойной длины. Если для двойного пролета заполнение трубы водой приводит к понижению собственных частот всех рассмотренных мод, то для одинарного пролета трубы

с водой собственные частоты четырех низших мод повышены в сравнении с пустой трубой. При этом и для одинарного, и для двойного пролета наличие воды в трубе наиболее сильно влияет на собственные частоты низших мод изгибных колебаний. Близкие результаты, представленные на рисунке 3.13 ромбическими и квадратными маркерами, показали и расчеты методом конечных элементов, выполненные с помощью программного комплекса MSC Nastran [Рычков, 2004].

Таким образом, результаты экспериментов показали, что по акустическим шумам, зарегистрированным на поверхности надземного трубопровода, в том числе малоканальной аппаратурой, можно определить собственные частоты и геометрические формы формирующихся в трубе изгибных стоячих волн. Эта информация может быть использована для оценки устойчивости опор трубопровода. Диагностическим признаком потери устойчивости опоры является наличие пучностей хотя бы у некоторых мод стоячих волн в окрестности крепления трубы к опоре.

В заключение нужно отметить, что хотя в последние годы теоретически обоснована возможность диагностирования качества закрепления участков трубопроводов только по их собственным частотам [Ахтямов и Сафина, 2004; Сафина, 2005, 2006], сами авторы этих работ отмечают неединственность решения такой обратной задачи. Действительно, изменение условий крепления на любом из двух концов участка трубы может приводить к одинаковым изменениям собственных частот. Дополнительная информация о формах колебаний стоячих волн, которая, как показано в данной главе, может быть получена при обработке зарегистрированных на поверхности трубы акустических шумов, позволяет однозначно диагностировать потерю устойчивости конкретной опоры.

Выводы по главе

1. На результатах физического моделирования показано, что собственные частоты и формы колебаний изгибных стоячих волн для участка трубопровода могут быть определены по зарегистрированным на поверхности трубы акустическим шумам, что дает возможность диагностировать потерю устойчивости опор надземных трубопроводов.
2. Собственные частоты физической модели трубопровода, определенные по шумовым данным, хорошо согласуются с частотами, рассчитанными методом конечных элементов.
3. Частичная или полная потеря устойчивости опоры, увеличивающая пролет между местами жесткого крепления трубы, проявляется в резком изменении структуры поля изгибных стоячих волн. Если в месте жесткого крепления трубы всегда образуются узлы стоячих мод, то при ослаблении жесткости эта закономерность нарушается.
4. При одинаковой длине первоначальных пролетов в месте нежесткого крепления одной из опор у четных мод изгибных стоячих волн наблюдаются узлы, а у нечетных – пучности.

ГЛАВА 4.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЯЧИХ ВОЛН СЖАТИЯ-РАСТЯЖЕНИЯ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ПОД ДЕЙСТВИЕМ МИКРОСЕЙСМ

Известно, что реакция земной поверхности на землетрясения сильно зависит от локальных геологических условий [Медведев, 1962; Borchardt, 1970; Рекомендации..., 1974, 1985; Павлов, 1988; Singh et al., 1988; Hough et al., 1990; Borchardt and Glassmoyer, 1992; Rial, 1996; Sun et al., 2005]. Эти условия, в частности строение и свойства пород верхней части разреза (ВЧР), могут значительно изменяться в пределах относительно небольших территорий. Поэтому для уточнения ожидаемой реакции на возможные сейсмические воздействия на участках, где локальные геологические условия могут приводить к значительному усилению (или снижению) вызванных землетрясениями колебаний земной поверхности, проводится сейсмическое микрорайонирование. Карты сейсмического микрорайонирования необходимы для планирования размещения различных, в особенности опасных, производств, при проектировании промышленных и гражданских сооружений, при оценке сейсмического риска для уже существующей инфраструктуры и т.д.

Существует несколько подходов к определению отклика земной поверхности на вызванные землетрясениями сейсмические воздействия [Медведев, 1962; Field and Jacob, 1995; Заалишвили, 2009]. Одним из лучших считается прямой метод, основанный на регистрации колебаний от сильных землетрясений. Однако такие землетрясения происходят достаточно редко и, как правило, лишь в сейсмоактивных регионах. Можно использовать для сейсмического микрорайонирования записи удаленных или слабых локальных землетрясений, но такой метод предполагает регистрацию данных на плотной сети станций в течение достаточно длительного периода наблюдений. Еще один метод основан на изучении строения и свойств пород ВЧР методами инженерной сейсмики и последующем расчете отклика ВЧР на сейсмические

воздействия. Этот метод достаточно дорогой, поэтому его иногда используют в упрощенном (одномерном) варианте, что в реальных условиях неоднородной по латерали ВЧР может приводить к большим погрешностям.

Записи микросейсм также широко используются для оценки реакции земной поверхности на возможные сейсмические воздействия [Рекомендации..., 1974, 1985; Сейсмическое..., 1984; Lermo et al., 1988; Nakamura, 1989; Потапов, 1992; Field et al., 1995; Bour et al., 1998; Mucciarelli, 1998; Gosar et al., 2001; Parolai et al., 2002; Mukhopadhyay and Bormann, 2004; Gosar, 2007; Nunziata, 2007; Черных, 1988, 2009; Picozzi et al., 2009; Mahajan et al., 2012]. Наиболее часто при использовании микросейсм для оценки резонансных свойств грунтов изучают их преобладающие периоды и амплитудные характеристики [Рекомендации..., 1974, 1985; Заалишвили, 2009]. Методы, основанные на регистрации микросейсм, относительно дешевы и не требуют больших временных затрат, но характеризуются не очень высокой точностью, в особенности при работах с малоканальной аппаратурой. Поэтому, как правило, они используются только в комплексе с другими инструментальными методами [Заалишвили, 2009].

Один из способов повышения точности сейсмического микрорайонирования с использованием записей микросейсм, полученных малоканальной аппаратурой, реализован в методике, описанной в работе [Еманов и др., 2008]. Методика, как и развиваемые авторами этой работы методы обследования зданий и сооружений, основана на пересчете разновременных данных к «единому» времени с использованием синхронных записей в опорных точках [Способ..., 2000; Еманов и др., 2002, 2008], что позволяет более эффективно выделять из микросейсмического поля его когерентные составляющие – формирующиеся в ВЧР стоячие волны.

Однако очевидно, что без опробования на объектах с известными строением и свойствами, подтверждающего достоверность получаемых результатов, правомерность применения любой методики микрорайонирования на реальных территориях не может считаться в достаточной мере

обоснованной. Ниже представлены результаты исследования возможностей методики определения резонансных свойств ВЧР [Еманов и др., 2008] на трехмерных физических моделях с контролируемым строением и свойствами [Колесников и Федин, 2013; Федин и Колесников, 2013; Kolesnikov et al., 2013^{1,2}; Колесников и др., 2013; Федин, 2014].

4.1. Методика экспериментов

Методика проведения экспериментов, как и процедура обработки экспериментальных данных, практически не отличались от методики, применявшейся для сейсмического микрорайонирования реальной территории [Еманов и др., 2008], с той лишь разницей, что измерения проводились в ультразвуковом диапазоне частот на масштабных моделях ВЧР. Кроме того, в моделях создавалось дополнительное шумовое поле, так как в лабораторных условиях уровень естественных шумов в ультразвуковом диапазоне частот был недостаточен для относительно быстрого получения экспериментальных данных. Акустический шум, как и в предыдущих экспериментах, генерировался с помощью устройства, работающего по принципу автомобильных дворников – возвратно-поступательными движениями щетки с жесткой щетиной, как правило, по нижним поверхностям моделей (см. рисунок 2.3). Схема экспериментов приведена на рисунке 4.1.

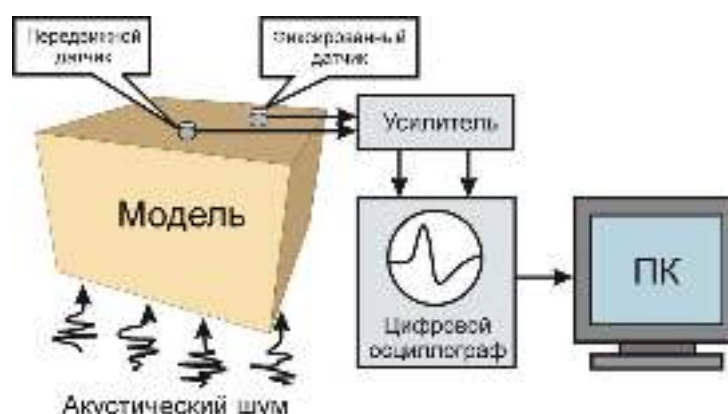


Рисунок 4.1 – Схема экспериментов

Регистрация шумовых сигналов производилась на верхних поверхностях моделей применявшимися и в предыдущих экспериментах двумя широкополосными датчиками поршневого типа, изготовленными на основе дисков из пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 2 мм и толщиной 1 мм. Оси максимальной чувствительности датчиков были ориентированы перпендикулярно поверхностям, на которых проводились измерения, поэтому регистрировались преимущественно вертикальные колебания типа сжатие-растяжение.

Как и в методике сейсмического микрорайонирования [Еманов и др., 2008], один датчик использовался как опорный – в экспериментах с каждой моделью он крепился неподвижно в одной из точек на ее верхней поверхности и его положение в течение всего эксперимента не менялось. Второй датчик в ходе экспериментов последовательно устанавливался также на верхней поверхности модели в узлах квадратной сетки размерностью 23×23 . Шаг сетки составлял 1 см. После установки передвижного датчика в каждой точке системы наблюдений производилась синхронная запись шумовых сигналов от обоих датчиков – после предварительного усиления они регистрировались двухканальным цифровым осциллографом В-423 и записывались на жесткий диск персонального компьютера (ПК) для последующей обработки. Длительность регистрации при каждом положении передвижного датчика составляла примерно 2 секунды при частоте дискретизации 1 МГц.

Применение одного или нескольких датчиков в качестве опорных позволяет использовать разновременные данные, полученные с помощью малоканальной (в нашем случае двухканальной) аппаратуры, для имитации одновременных наблюдений в большом числе точек. Алгоритм пересчета данных к «единому» времени, программная реализация которого использовалась при обработке данных физического моделирования стоячих волн в ВЧР, детально описан в работах [Еманов и др., 2002, 2008].

4.2. Модели верхней части разреза

Эксперименты проводились на объемных физических моделях, изготовленных из трех видов бетона, для приготовления которых использовался речной песок с размерами частиц до 2 мм и цемент марки М400 в разных весовых соотношениях. Технология изготовления моделей – последовательная отливка с промежуточной механической обработкой уже затвердевших частей – позволила обеспечить условия жесткого контакта отдельных частей моделей и надежный контроль основных геометрических размеров (мощности слоев).

Состав использованных при изготовлении моделей песчано-цементных смесей и измеренные в модельных материалах скорости продольных V_p и поперечных V_s волн, а также плотности ρ приведены в таблице 4.1. Погрешность измерений при определении плотности не превышала 0.5%, а при определении скоростей – 2%. Модели имели форму прямоугольных параллелепипедов с размерами оснований примерно 25×25 см². Схематическое изображение исследованных моделей показано на рисунке 4.2.

Таблица 4.1 - Состав и свойства модельных материалов

Бетон	Песок/цемент	V_p , м/с	V_s , м/с	ρ , г/см ³
Б1	4:1	1350	740	1.48
Б2	2:1	2760	1530	1.94
Б3	1:1	4450	2350	2.27

Условные названия и основные параметры моделей:

- двухслойная среда (рисунок 4.2а) – нижний слой мощностью 8 см из бетона Б3, верхний слой мощностью 7.5 см из бетона Б2;
- трехслойная среда (рисунок 4.2б) – нижний слой мощностью 8 см из бетона Б3, средний слой мощностью 7.5 см из бетона Б2, верхний слой мощностью 2.5 см из бетона Б1;

- слой над вертикальной границей блоков (рисунок 4.2в) – высота блоков 23.5 см при толщине 11 см (бетон Б3) и 14 см (бетон Б2), верхний слой мощностью 2 см из бетона Б1.

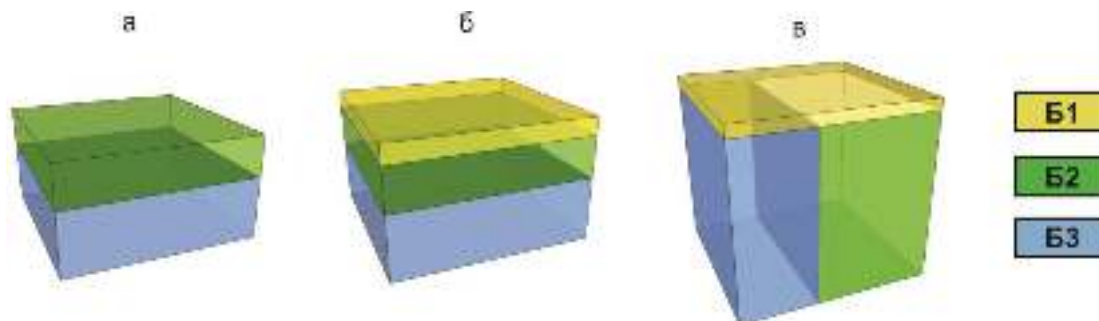


Рисунок 4.2 - Геометрия моделей: а) двухслойная и б) трехслойная среды; в) слой над вертикальной границей блоков. Свойства бетонов Б1-Б3 – см. таблицу 4.1

Как показано ниже, из-за относительно небольших размеров физических моделей резонансные свойства их верхних слоев могут отличаться от резонансных свойств таких же слоев, например, на полупространстве. Тем не менее, зная геометрические характеристики моделей и упругие свойства материалов, легко можно оценить (в том числе с помощью численного моделирования) значения собственных частот, связанных с вертикальными резонансами верхних слоев физических моделей. Это позволяет использовать полученные в экспериментах на таких моделях шумовые записи в качестве модельных данных для верификации исследуемого метода изучения резонансных свойств верхней части разреза.

4.3. Определение резонансных свойств приповерхностных слоев постоянной мощности

Как отмечалось выше, использовавшиеся в экспериментах датчики поршневого типа регистрировали преимущественно вертикальные колебания верхних поверхностей моделей. Поэтому из всего разнообразия стоячих волн, которые в принципе могут возникать в верхних слоях постоянной мощности, наибольший вклад в экспериментальные записи должны вносить стоячие волны

вертикального сжатия-растяжения. Так как скорости продольных волн в модельных материалах известны, возможные частоты таких стоячих волн легко оценить.

Известно, что при возникновении стоячих волн в слое на его границах, в зависимости от условий отражения, образуются либо узлы, либо пучности колебаний [Лепендин, 1978]. Для слоя с одной свободной и другой абсолютно жестко закрепленной границей при резонансных явлениях на свободной границе должны наблюдаться пучности, а на закрепленной – узлы стоячих волн. При этом на толщине слоя должно укладываться нечетное число четвертей длин волн, а собственные частоты для вертикальных колебаний слоя определяются формулой

$$f_n = \frac{(2n-1)V_p}{4h}, \quad (4.1)$$

где n – номер моды стоячих волн, V_p – скорость продольных волн, h – толщина слоя.

При резонансе слоя с двумя свободными или с двумя жестко закрепленными границами на них должны наблюдаться, соответственно, либо только пучности, либо только узлы, а на толщине слоя должно укладываться целое число полудлин стоячих волн. Собственные частоты слоя для его вертикальных колебаний в этом случае равны

$$f_n = \frac{nV_p}{2h}. \quad (4.2)$$

Рассмотрим вначале экспериментальные результаты для более простых двух- и трехслойной моделей (рисунки 4.2а и 4.2б). Если бы верхние слои этих моделей лежали на абсолютно жестком полупространстве, частоты низших мод стоячих волн вертикального сжатия-растяжения в них, согласно формуле (4.1), должны были быть равны 9.2 кГц для двухслойной и 13.5 кГц для трехслойной моделей. Частоты мод более высоких порядков должны равняться этим значениям, умноженным на нечетные числа (3, 5, 7 и т.д.). Однако на осредненных по времени (по блокам длиной 4096 отсчетов) и всем точкам наблюдений амплитудных спектрах экспериментальных шумовых записей

(рисунок 4.3) видно, что наиболее резкие резонансные пики наблюдаются на частотах, кратных 18.4 кГц для двухслойной и 27 кГц для трехслойной моделей, что согласуется с формулой (4.2). То есть резонансные явления в верхнем слое моделей происходят подобно таковым в слое с двумя свободными (или двумя жестко закрепленными) границами.

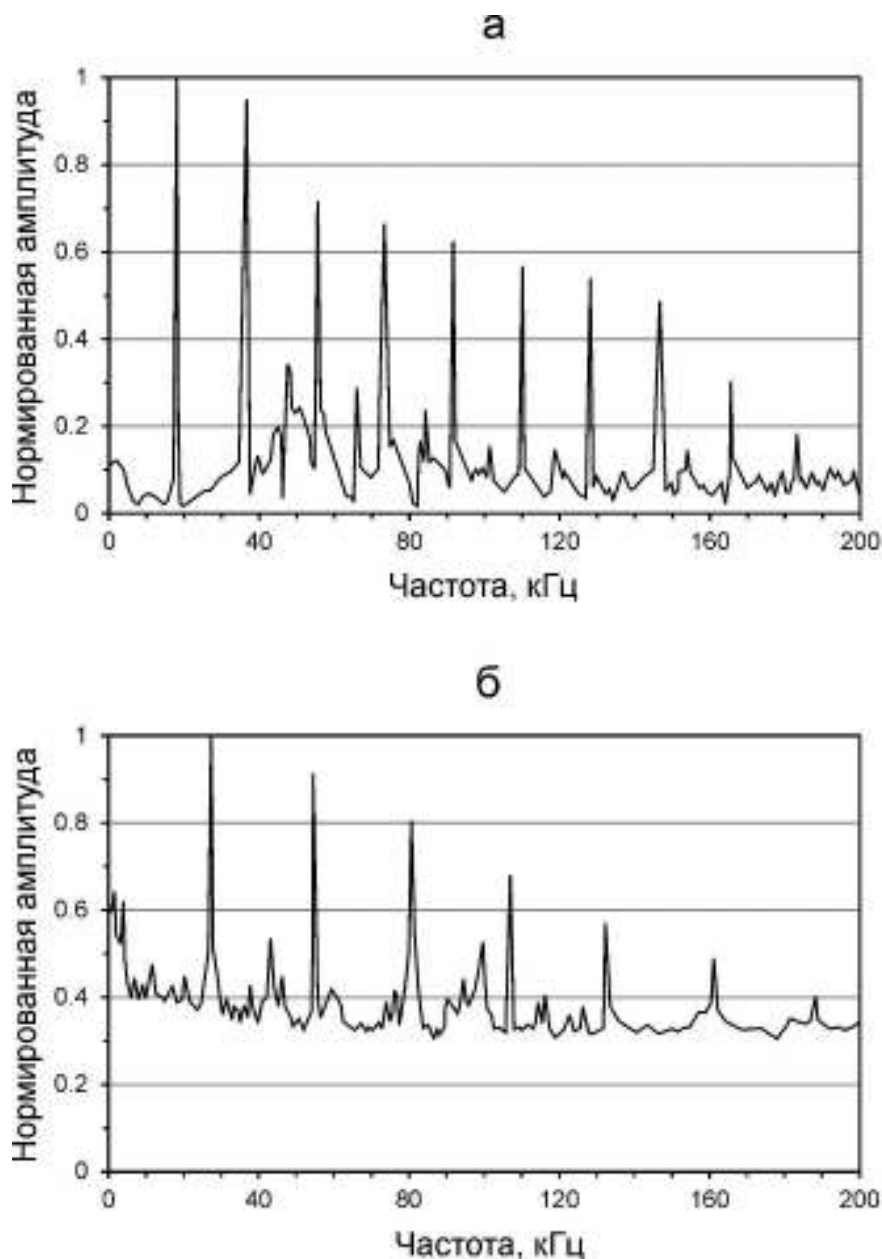


Рисунок 4.3 - Осредненные по времени и точкам наблюдений амплитудные спектры двухсекундных шумовых записей, зарегистрированных на моделях двухслойной (а) и трехслойной (б) сред

Мы предположили, что этот несколько неожиданный эффект может быть связан с ограниченными размерами физических моделей. Чтобы проверить, как размеры модели влияют на ее резонансные свойства, были проведены расчеты

резонансов, возникающих в двух- и трехслойной моделях под действием акустического белого шума. Компьютерное моделирование проводилось методом конечных элементов с помощью программного комплекса MSC Nastran [Рычков, 2004]. При расчетах акустическое воздействие задавалось на нижних гранях расчетных моделей с верхними слоями той же мощности, что и у физических моделей, но с изменяющимися поперечными размерами и мощностью нижнего слоя. Плотности и скорости продольных и поперечных волн принимались такими же, как у материалов физических моделей, на границах слоев задавались условия жесткого контакта. Шаг расчетной сетки задавался равным 1 мм.

На рисунке 4.4 приведены амплитуды основных резонансов в полосе частот 0-100 кГц, рассчитанных для нашей двухслойной модели (рисунок 4.4а), а также для моделей, в которых при такой же толщине верхнего слоя (7.5 см) внешние размеры моделей увеличены до $50 \times 50 \times 50 \text{ см}^3$ (рисунок 4.4б) и $200 \times 200 \times 200 \text{ см}^3$ (рисунок 4.4в).

Как показали расчеты для модели, использованной в наших экспериментах (рисунок 4.4а), повышенные амплитуды наблюдаются у резонансов, кратных 18.4 кГц, что согласуется с формулой (4.2) и с экспериментальным спектром (рисунок 4.3а). В то же время на рисунке 4.4а присутствуют и довольно сильные промежуточные резонансы на частотах, определяемых формулой (4.1), которые на экспериментальном спектре (рисунок 4.3а) либо отсутствуют, либо имеют пониженные амплитуды и несколько отличающиеся частоты.

Увеличение внешних размеров модели при компьютерном моделировании (рисунки 4.4б и 4.4в) приводит к постепенному возрастанию амплитуд резонансов на частотах, определяемых формулой (4.1), относительно резонансов, определяемых формулой (4.2), что подтверждает наше предположение о влиянии размеров нижележащей толщи на резонансные свойства приповерхностного слоя.

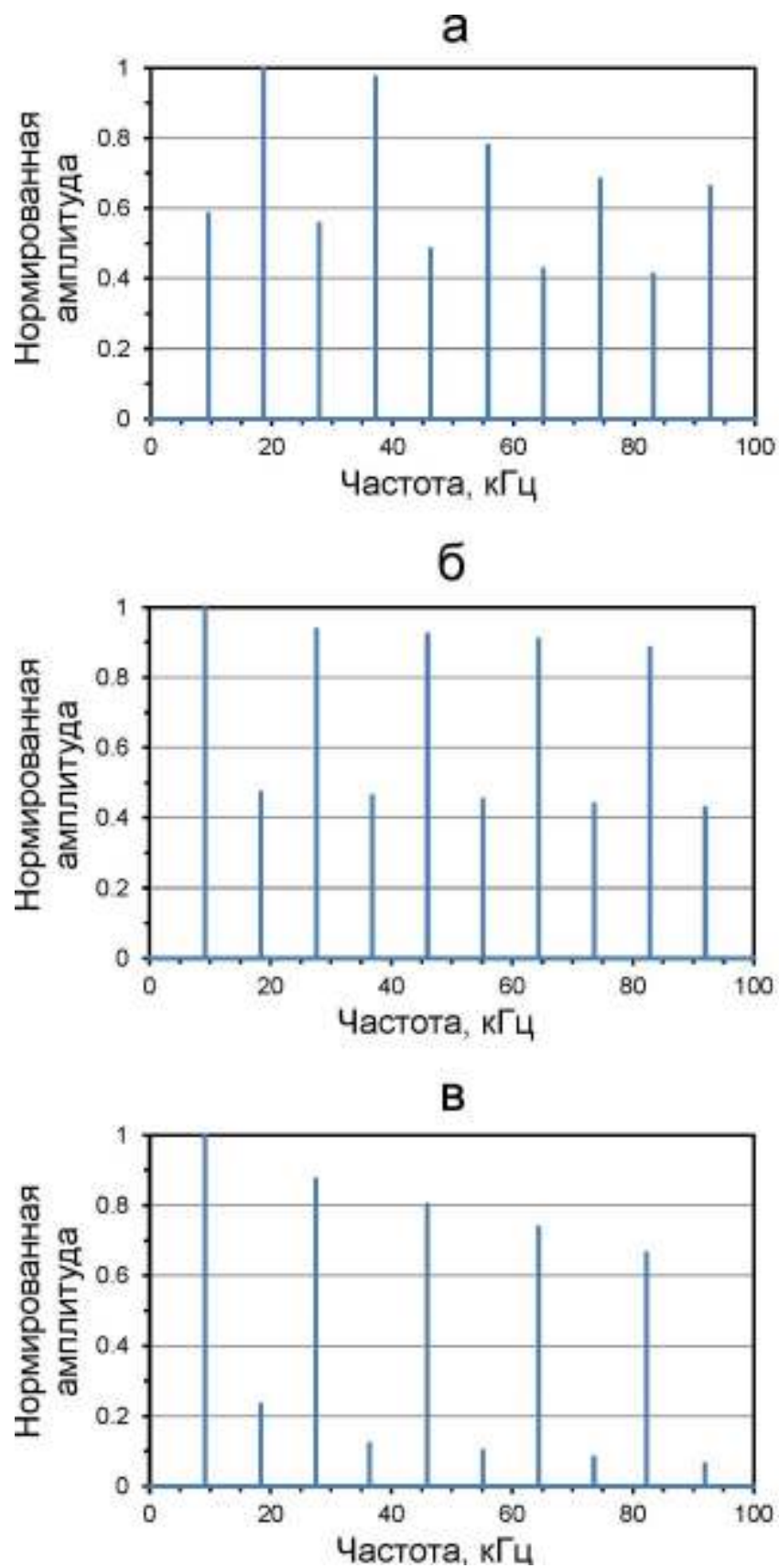


Рисунок 4.4 - Относительное изменение амплитуд резонансных пиков с увеличением внешних размеров двухслойной модели при неизменной мощности верхнего слоя (компьютерное моделирование, см. текст)

Подобные результаты компьютерного моделирования, свидетельствующие о влиянии размеров модели на резонансные свойства приповерхностного слоя, получены и для трехслойной модели (рисунок 4.5). При этих расчетах мощность двух верхних слоев оставалась неизменной, а внешние размеры модели изменялись так же, как при расчетах для двухслойной модели (рисунок 4.4). Нужно также заметить, что на экспериментальном спектре для трехслойной модели заметных пиков, связанных с резонансами в среднем слое, не наблюдается (см. рисунок 4.3б), хотя эта модель была изготовлена из двухслойной модели путем добавления к ней сверху еще одного слоя. Не наблюдается таких пиков (по крайней мере явно выраженных) и при компьютерном моделировании (рисунок 4.5). Более того, в экспериментальных спектрах, полученных для обеих моделей (рисунок 4.3), нет явных пиков, связанных с резонансами в нижнем слое. Это свидетельствует о том, что из всевозможных резонансов, возникающих в геологической среде, наиболее сильно на дневной поверхности должны проявляться резонансные явления в ВЧР.

По представленным графикам (рисунки 4.3–4.5) трудно визуально оценить, насколько отличаются собственные частоты, определенные по данным физического и компьютерного моделирования, поэтому результаты сравнения для пяти мод стоячих волн представлены в таблице 4.2 в численном виде. Как можно видеть из таблицы, отличия частот, определенных численно и экспериментально, не превышают 1.6%. При этом отличия имеют регулярный характер, что может быть связано с погрешностью определения геометрических размеров или свойств материалов физической модели, использованных при компьютерном моделировании.

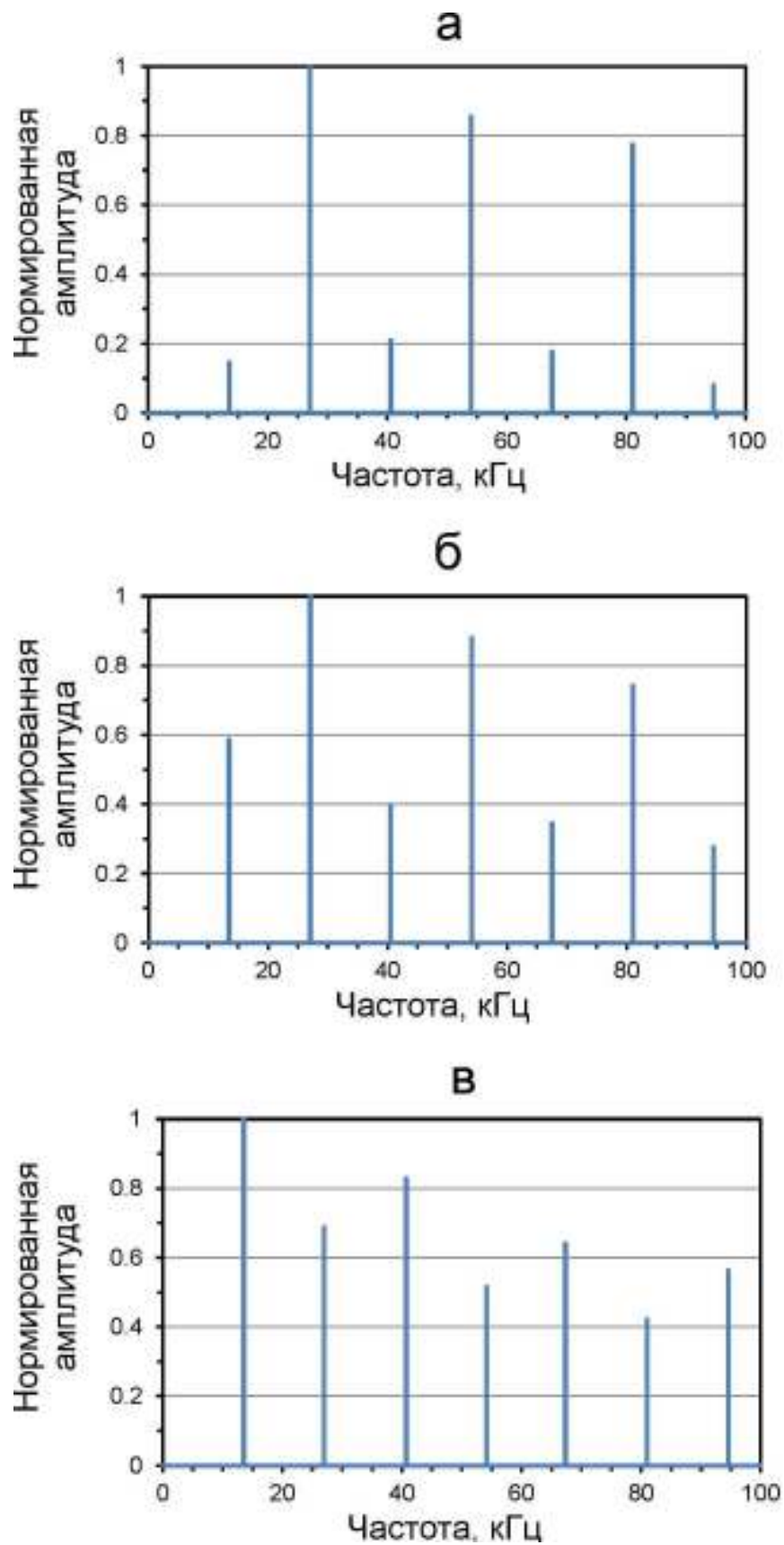


Рисунок 4.5 - Относительное изменение амплитуд резонансных пиков с увеличением внешних размеров трехслойной модели при неизменной мощности двух верхних слоев (компьютерное моделирование)

Таблица. 4.2 - Сравнение собственных частот двухслойной модели, определенных с помощью физического f^Φ и компьютерного f^K моделирования для стоячих волн сжатия-растяжения

№ моды	f^Φ , кГц	f^K , кГц	f^Φ/f^K
1	18.36	18.66	0.984
2	36.76	37.2	0.988
3	55.04	55.82	0.986
4	73.46	74.45	0.987
5	91.9	92.58	0.993

Несмотря на искажение резонансных свойств верхних слоев из-за ограниченных размеров физических моделей, данные экспериментов на двух- и трехслойной моделях позволяют продемонстрировать, как пересчет разновременных данных, записанных малоканальной (в нашем случае двухканальной) аппаратурой, к «единому» времени позволяет нивелировать влияние нестационарности шума на результаты выделения его когерентных составляющих (стоячих волн).

Это иллюстрируют рисунки 4.6-4.7, на которых приведены распределения амплитуд низшей моды стоячих волн по площади наблюдений для моделей двух- и трехслойной сред до и после пересчета шумовых данных к «единому» времени. Для двухслойной модели это амплитуды резонансных пиков на частоте 18.4 кГц, для трехслойной – пиков на частоте 27 кГц. Как можно видеть, разброс амплитуд, которые для однородного слоя постоянной мощности в идеале должны быть практически одинаковы на всей площади наблюдений, после пересчета снижается почти на порядок. Аналогичные результаты получены и для мод более высоких порядков.

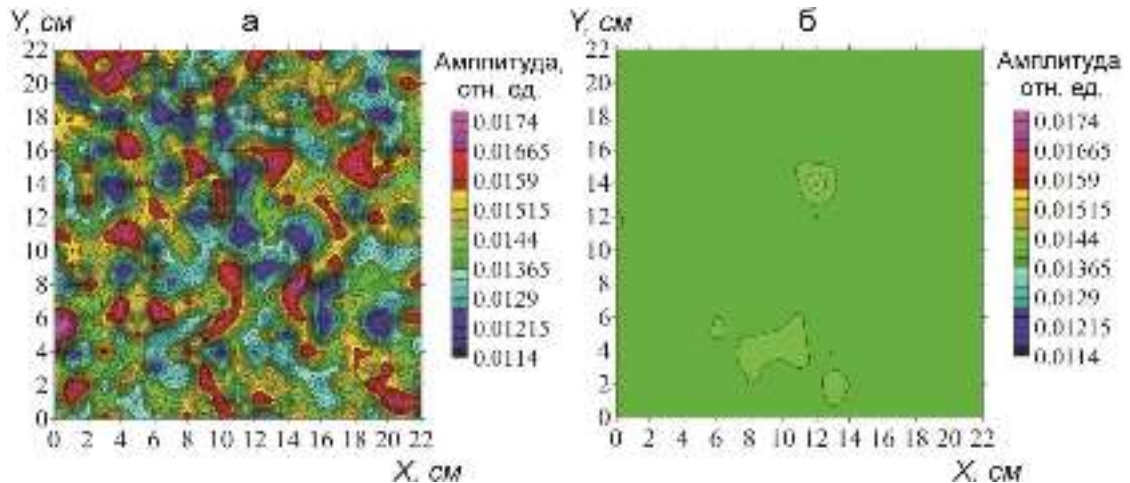


Рисунок 4.6 - Распределение амплитуд низшей моды стоячих волн на верхней грани модели двухслойной среды до (а) и после (б) пересчета разновременных данных к «единому» времени

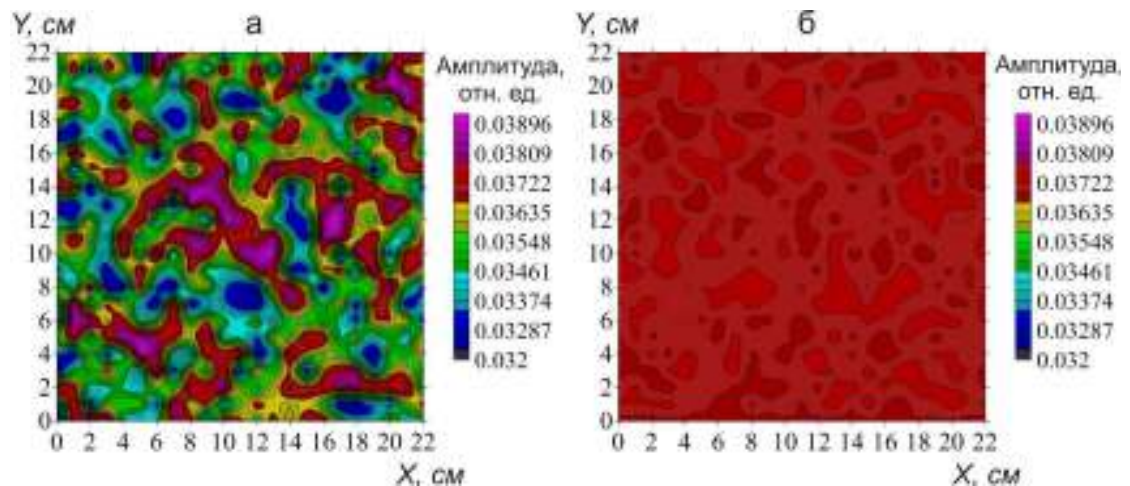


Рисунок 4.7 - Распределение амплитуд низшей моды стоячих волн на верхней грани модели трехслойной среды до (а) и после (б) пересчета разновременных данных к «единому» времени

4.4. Влияние подстилающей среды на резонансные свойства приповерхностного слоя

Результаты, полученные для еще одной модели слоя постоянной мощности, залегающего над двумя блоками из разных материалов, разделенных жесткой вертикальной границей (рисунок 4.2в), иллюстрируют, как исследуемый метод реагирует на изменение резонансных свойств поверхностного слоя при изменении параметров подстилающей среды. Нужно

заметить, что в эксперименте с этой моделью шум генерировался на ее верхней поверхности, т.е. моделировались экзогенные микросейсмы. Несмотря на увеличение трудоемкости эксперимента (измерения проводились также на верхней поверхности модели), такой прием позволил избежать влияния на динамические характеристики шумовых записей различных условий излучения шума в блоки с неодинаковыми упругими и поверхностными свойствами, а также разных условий отражения-преломления на границе верхнего слоя с подстилающими блоками.

Осредненный по времени спектр шумовых данных, записанных в одной из точек наблюдений над блоком из бетона БЗ, показан на рисунке 4.8. Как можно видеть, спектр для этой модели имеет более сложную структуру, чем спектры для двух- и трехслойной моделей. Тем не менее, в отличие от слоистых моделей, как в данной точке, так и на всей площади наблюдений частота пика с максимальной амплитудой равна 16.9 кГц, что совпадает со значением, которое дает формула (4.1) для низшей моды стоячих волн в слое с жестко закрепленной нижней и свободной верхней границами. Также в экспериментальных спектрах присутствуют резонансные пики на других частотах (50.5 кГц и 84.3 кГц), близких к тем, которые дает формула (4.1) для мод более высоких порядков (50.6 и 84.4, соответственно). Тот факт, что в спектре для данной модели появились хорошо выраженные резонансные пики на частотах, определяемых формулой (4.1), по-видимому, является следствием того, что при относительно тонком верхнем слое мощность подстилающего слоя из двух блоков у этой модели значительно больше, чем у двух- и трехслойной моделей.

В спектре также есть и в среднем несколько меньшие по амплитуде промежуточные резонансные пики на частотах, согласующихся с формулой (4.2), а также довольно большое число других пиков. Как показало численное моделирование, эти пики также связаны с ограниченными размерами модели.

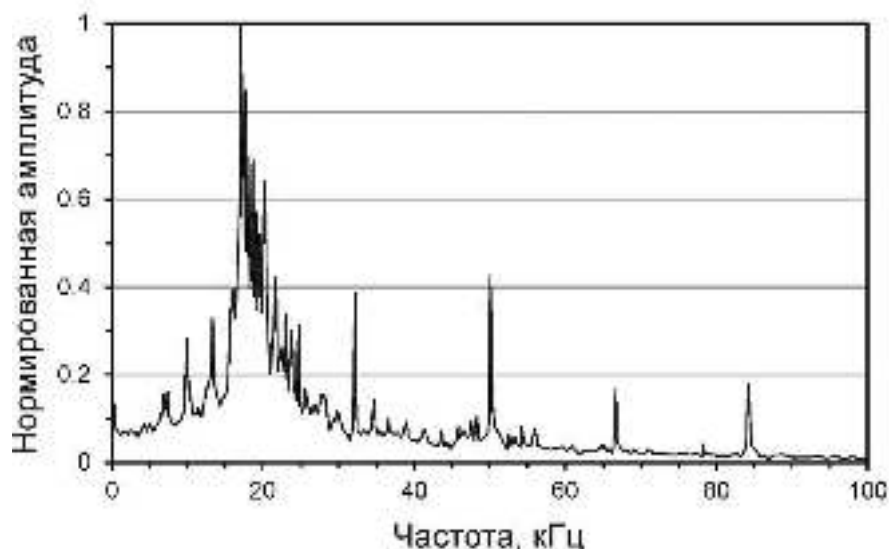


Рисунок 4.8 - Пример осредненного по времени экспериментального спектра шума, зарегистрированного на поверхности модели со слоем над вертикальной границей блоков

На рисунке 4.9 показаны основные резонансы, рассчитанные методом конечных элементов для модели слоя над вертикальной границей блоков. При численном моделировании размеры блоков сначала задавались такими же, как в физической модели. Большинство рассчитанных резонансов в этом случае (рисунок 4.9а) по частоте совпали с соответствующими пиками экспериментального спектра (рисунок 4.8), хотя соотношения амплитуд отдельных резонансов для численной и физической моделей согласуются лишь на качественном уровне. Затем размеры численной модели были увеличены (при неизменной мощности верхнего слоя) до $100 \times 100 \times 100 \text{ см}^3$ (рисунок 4.9б) и $200 \times 200 \times 200 \text{ см}^3$ (рисунок 4.9в). Как видно из рисунка, увеличение размеров модели при неизменной мощности верхнего слоя и в этом случае приводит к постепенному уменьшению резонансных пиков, частоты которых не соответствуют формуле (4.1).

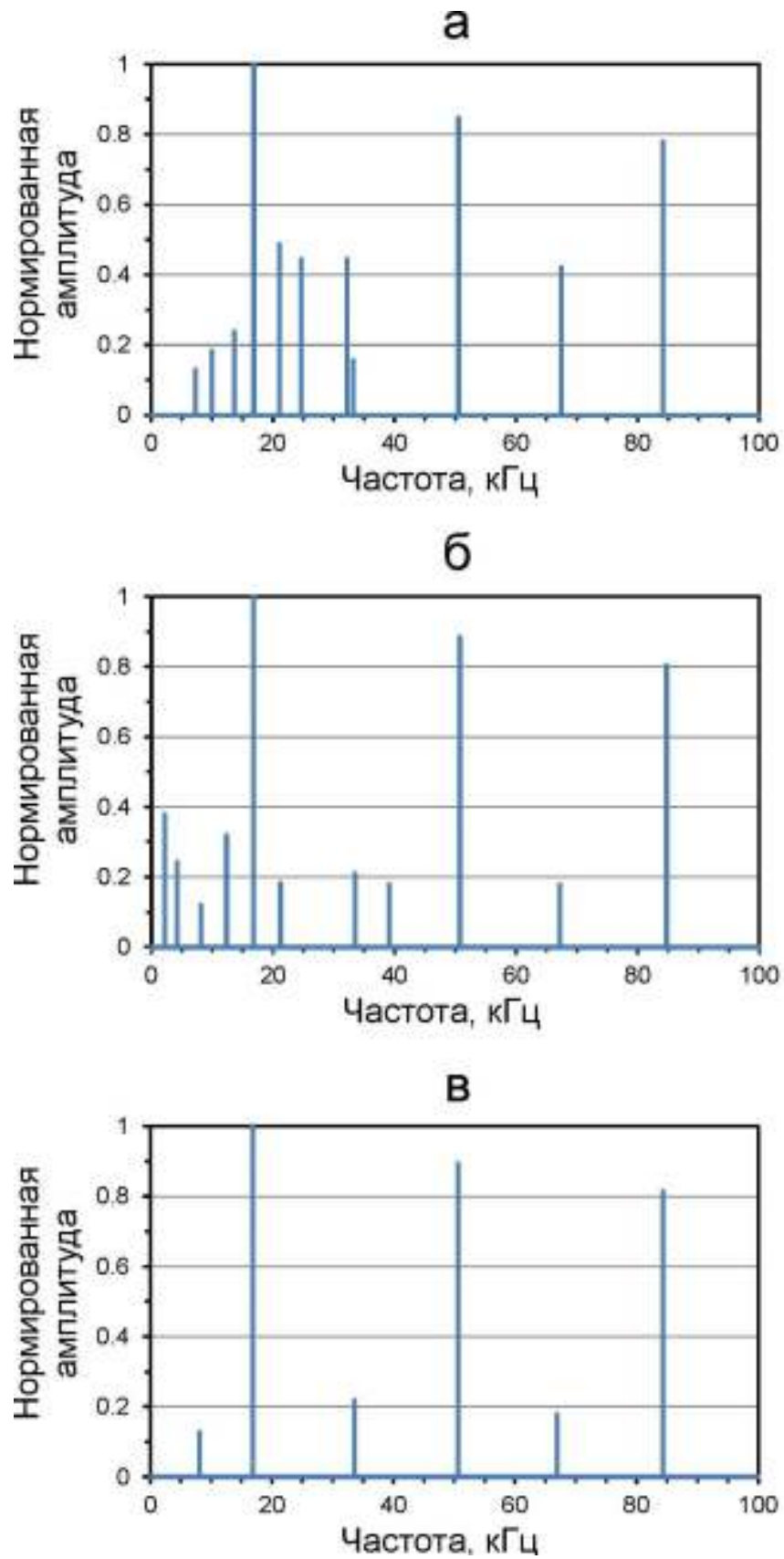


Рисунок 4.9 - Относительное изменение амплитуд резонансных пиков с увеличением размеров модели со слоем над вертикальной границей блоков при неизменной мощности слоя (компьютерное моделирование, см. текст)

На рисунке 4.10 показаны распределения амплитуд низшей моды стоячих волн (резонансного пика на частоте 16.9 кГц) по площади наблюдений для модели слоя над вертикальной границей двух блоков (рисунок 4.2в), полученные до и после пересчета разновременных экспериментальных данных к «единому» времени. Как можно видеть, и для этой модели пересчет данных к «единому» времени позволяет существенно снизить влияние нестационарности шумового поля на результаты выделения его когерентных составляющих (стоячих волн). Нужно заметить, что в ходе данного эксперимента характер шумового воздействия от записи к записи изменялся в намного больших пределах, чем в экспериментах со слоистыми моделями – шум на верхней поверхности модели приходилось генерировать вручную в разных ее частях, так как на этой же поверхности проводились измерения. Тем не менее, как видно из рисунка, разброс амплитуд низшей моды после пересчета к «единому» времени снижается в разы.

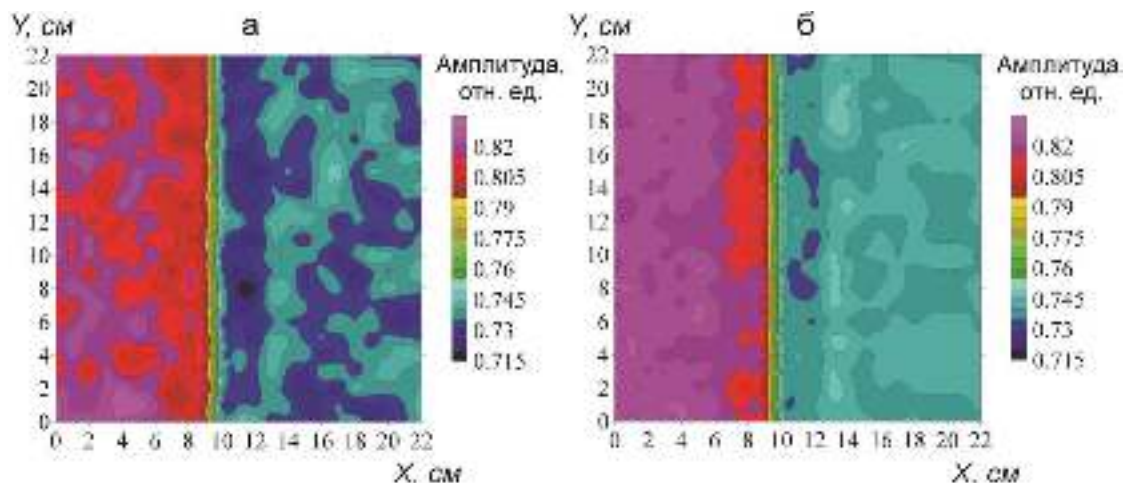


Рисунок 4.10 - Распределение амплитуд низшей моды стоячих волн на верхней грани модели слоя над вертикальной границей блоков до (а) и после (б) пересчета разновременных данных к «единому» времени. Вертикальная граница в подстилающей среде соответствует $X=9.5$ см, зона повышенных амплитуд слева от границы находится над более жестким бетоном Б3

Рисунок 4.10 также иллюстрирует, как свойства подстилающей среды влияют на амплитуды резонансов в приповерхностном слое. Как можно видеть, амплитуда низшей моды над блоком из бетона Б2 примерно на 10% ниже, чем над более жестким блоком из бетона Б3. Похожая закономерность наблюдается

и для мод более высоких порядков. Эти результаты хорошо согласуются с данными компьютерного моделирования, проведенного для данной модели (рисунок 4.11).

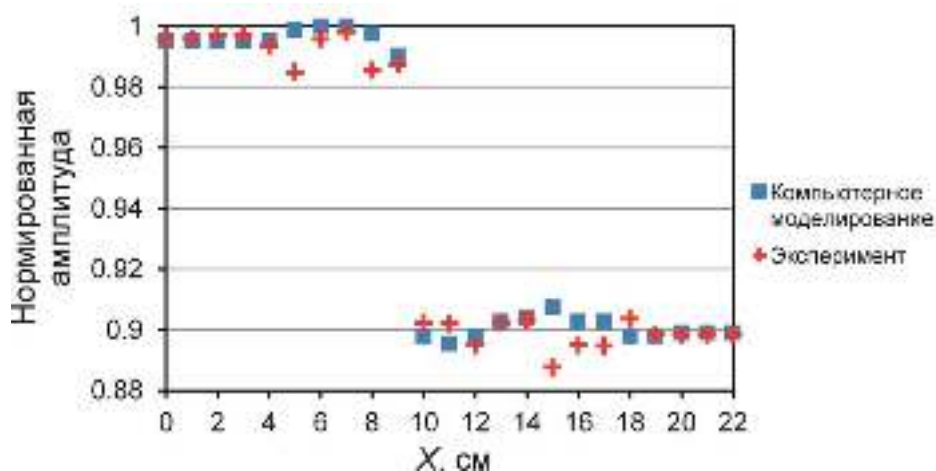


Рисунок 4.11 - Амплитуды низшей моды стоячих волн на верхней грани модели слоя над границей блоков, полученные для линии $Y=11$ см экспериментально и при компьютерном моделировании

В целом полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о высокой эффективности исследуемого метода определения резонансных свойств верхней части разреза по шумовому полю.

4.5. Обсуждение результатов моделирования

Очевидно, что на практике полностью удовлетворить всем условиям подобия при физическом моделировании сейсмических волновых процессов невозможно. Этот тезис наглядно иллюстрируется проведенным в данной главе сравнением полученных экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования, которое демонстрирует очень сильную зависимость резонансных свойств поверхностных слоев фиксированной мощности от других размеров модели.

Тем не менее, даже при невыполнении тех или иных условий подобия, проведение физического моделирования можно считать обоснованным, если оно позволяет экспериментально проверить эффективность какого-либо метода

получения экспериментальных данных, их обработки, анализа и т.д. В нашем случае физическое моделирование позволило верифицировать метод определения резонансных свойств верхней части разреза по выделяемым из микросейсмического поля стоячим волнам, основанный на пересчете разновременных данных к «единому» времени. Как убедительно показало сравнение экспериментальных данных и результатов расчетов методом конечных элементов, этот метод эффективно выделяет из шумов реальные резонансы в верхнем слое исследованных моделей, хотя они и не подобны резонансным свойствам натурных объектов.

Как можно видеть на примерах приведенных на рисунках 4.3 и 4.8 накопленных амплитудных спектров, кроме выделенных нами спектральных пиков, связанных со стоячими волнами сжатия-растяжения в верхнем слое, наблюдаются и другие максимумы, хотя и намного менее выраженные. Подобные пики, в основном имеющие относительно небольшую амплитуду, присутствуют и на спектрах, полученных для других моделей. Частоты некоторых из них, как показало компьютерное моделирование методом конечных элементов, меняются при изменении размеров моделей, и, таким образом, эти пики не имеют отношения к образующимся в слоистой среде стоячим волнам вертикального сжатия-растяжения. Часть малоамплитудных пиков может быть обусловлена спектральными особенностями шумового поля.

Некоторые из наблюдавшихся в экспериментах малоамплитудных пиков могут быть связаны и с образованием стоячих волн в нижележащих слоях моделей. Однако в натурных условиях перепад акустических жесткостей ВЧР и нижележащих пород, как правило, намного больше, чем в наших моделях. Поэтому можно ожидать, что *in situ* влияние образующихся под ВЧР стоячих волн на спектры наблюдаемых на поверхности колебаний будет еще менее заметным.

Одна из особенностей методики, по которой проводились наши эксперименты, состояла в том, что измерения, как правило, проводились по площадной схеме на верхней грани модели, а источник шума находился на ее

нижней грани, т.е. фактически моделировался эндогенный шум. В то же время многие исследователи полагают [см., например, Toksöz, and Lacoss, 1968; Horike, 1985; Yamanaka et al., 1994; Liu et al., 2000; Bodin et al., 2001; Asten, 2004; Bonnefoy-Claudet et al., 2006; Горбатиков и др., 2008; Кутаенко и др., 2010], что в большинстве случаев в поле микросейсм доминируют колебания, связанные с поверхностными источниками.

Для оценки того, как положение источников микросейсм влияет на результаты выделения стоячих волн из микросейсмического поля, было проведено сравнение результатов двух дополнительных экспериментов с двухслойной моделью. В одном случае акустический шум возбуждался на нижней грани модели, имитируя эндогенные микросейсм, в другом – на ее верхней грани (экзогенный шум), а регистрация колебаний велась в одной из точек верхней грани над более жестким подстилающим блоком. В обоих случаях после накопления спектров шумовых записей на осредненном спектре отчетливо выделялась одна и та же серия спектральных пиков, связанных со стоячими волнами в верхнем слое модели. При этом амплитуды резонансных пиков были на несколько десятков процентов больше при моделировании экзогенного шума, но их отношение к фоновым спектральным составляющим между резонансными пиками было существенно больше при моделировании эндогенного шума.

Как уже отмечалось, в наших экспериментах для регистрации акустического шума использовались датчики с вертикально направленной осью максимальной чувствительности, и таким образом исследовались резонансные свойства моделей ВЧР, связанные с интерференцией многократно отражающихся в приповерхностных слоях продольных волн. Однако с большой долей уверенности можно ожидать, что и при регистрации акустического шума сдвиговыми датчиками будут получены подобные результаты с той лишь разницей, что резонансные частоты будут определяться отношением скорости не продольной, а поперечной волны в верхнем слое (или другой приповерхностной неоднородности) к его толщине.

Выводы по главе

1. Разработана методика моделирования стоячих волн сжатия-растяжения, формирующихся в приповерхностных слоях (ВЧР) под воздействием микросейсм.
2. На физических моделях верифицирован метод определения резонансных свойств верхней части разреза по выделяемым из микросейсмического поля стоячим волнам, основанный на пересчете разновременных данных к «единому» времени.
3. Результаты моделирования подтвердили, что при использовании малоканальной аппаратуры такой пересчет существенно уменьшает погрешности измерений, связанные с нестационарным характером микросейсмического поля.
4. Определенные экспериментально частотные и амплитудные характеристики стоячих волн хорошо согласуются с результатами численного моделирования методом конечных элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты модельных исследований стоячих волн, формирующихся в ограниченных телах под действием сейсмоакустических шумов, на предмет их применения для решения задач инженерной сейсмологии. Основным методом исследования – физическое моделирование акустических шумовых полей в трехмерных моделях различных природных и искусственных объектов.

Разработана методика физического моделирования генерируемых шумами упругих стоячих волн, характеризующаяся высокой детальностью при использовании малоканальной аппаратуры и повышенной производительностью за счет применения искусственного источника шума. Для выделения стоячих волн из шумов применялся метод разделения когерентных и некогерентных составляющих волновых полей, основанный на пересчете разновременных данных к «единому» времени, на базе которого создана успешно развиваемая в последние годы методика инженерно-сейсмологического обследования зданий и сооружений стоячими волнами [Еманов и др., 2001, 2002].

На результатах физического моделирования показана возможность выделения стоячих волн из шумового поля в килогерцовом диапазоне, что может быть использовано, в том числе, для обследования относительно небольших объектов, например, различных конструктивных элементов сооружений. На примере простых моделей (балок с дефектами и надземных трубопроводов) показана возможность применения выделяемых из шумового поля стоячих волн для диагностирования и мониторинга различных объектов на предмет выявления и идентификации возникающих в них дефектов.

На трехмерных физических моделях исследованы возможности метода детального изучения резонансных свойств верхней части разреза по разновременным записям микросейсм, полученным на плотной сети наблюдений с помощью малоканальной аппаратуры. Результаты

моделирования стоячих волн в ВЧР подтвердили, что при использовании малоканальной аппаратуры пересчет разновременных данных к «единому» времени существенно уменьшает погрешности измерений, связанные с нестационарным характером микросейсмического поля.

Результаты физического моделирования в большинстве случаев сопоставлялись с данными компьютерного моделирования методом конечных элементов. Хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных говорит о высокой достоверности полученных результатов.

В дальнейшем разработанную методику физического моделирования предполагается использовать для изучения возможностей применения формирующихся под действием шумов упругих стоячих волн для диагностирования и мониторинга более сложных природных и искусственных объектов, а также для верификации различных методов решения задач инженерной сейсмологии пассивными сейсмоакустическими методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверко, Е.М. Моделирование сейсмических полей и способов их обработки / Е.М. Аверко, Л.А.Максимов – Новосибирск: Наука, 1984. – 86 с.
2. Аверко, Е.М. Подобие сейсмических процессов / Е.М. Аверко // Геоакустические исследования по многоволновой сейсморазведке: Сб. науч. тр. / АН СССР, Сиб. отделение, Институт геологии и геофизики. – Новосибирск: ИГиГ, 1987¹. – С. 5-20.
3. Аверко, Е.М. Подобие сейсмических явлений и устройств / Е.М. Аверко // Исследования по многоволновой сейсморазведке в геоакустическом диапазоне частот: Сб. науч. тр. / АН СССР, Сиб. отделение, Институт геологии и геофизики. – Новосибирск: ИГиГ, 1987². – С. 5-30.
4. Аверко, Е.М. Подобие сейсмического явления в поле объемных сил / Е.М. Аверко // Геоакустические исследования. Методика и аппаратура: Сб. науч. тр. / АН СССР, Сиб. отделение, Институт геологии и геофизики. – Новосибирск: ИГиГ, 1988. – С. 5-20.
5. Аки, К. Количественная сейсмология: Теория и методы. Т. 1. / К. Аки, П. Ричардс. – М.: Мир, 1983. – 520 с.
6. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / Отв. ред. Г.М. Цибульчик. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал «Гео» Изд-ва СО РАН, 2004. – 387 с.
7. Акуленко, Л.Д. Собственные колебания участка трубопровода / Л.Д. Акуленко, Л.И. Коровина, С.В. Нестеров // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2011. – № 1. – С. 172-187.
8. Арсеньева, Н.М. Сейши на озерах СССР / Н.М. Арсеньева, Л.К. Давыдов, Л.Н. Дубровина, Н.Г. Конкина. – Л.: Изд-во ЛГУ, – 1963. – 184 с.
9. Ахтямов, А.М. Диагностирование относительной жесткости упругих краевых ребер цилиндрической оболочки [Электронный ресурс]. / А.М.

- Ахтямов, Г.Ф. Сафина // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2004. № 19. – С. 1–8. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/diagnostirovanie-otnositelnoy-zhestkosti-uprugih-kraevyh-reber-tsilindricheskoy-obolochki>, свободный.
10. Бат, М. Спектральный анализ в геофизике / М. Бат. – М.: Недра, 1980. – 535 с.
 11. Бендат, Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол – М.: Мир, 1971. – 408 с.
 12. Березнев, А.В. Влияние внутреннего гидростатического давления на частоты свободных колебаний криволинейного участка трубопровода / А.В. Березнев // Известия вузов. Нефть и газ. – 2011. – № 3. – С. 77-80.
 13. Бержинский, Ю.А. Экспериментальные исследования сейсмостойкости безригельного каркаса в г. Иркутске / Ю.А. Бержинский, Л.П. Бержинская, Л.И. Иванькина, А.П. Ордынская, Г.Н. Масленникова, В.А. Павленов, Е.Н. Черных, Г.И. Татьков // Труды 5 Российско-Монгольской конференции по астрономии и геофизике, Истомино, Бурятия, 23-28 сент., 2004. – Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2005. – С. 136-139.
 14. Бобров, Б.А. Программно-аппаратурный комплекс "Эхо-1" для ультразвукового сейсмического моделирования: методические рекомендации / Б.А. Бобров, Л.Д. Гик, Н.М. Держи, Ю.А. Орлов – Новосибирск: ИГиГ, 1984. – 124 с.
 15. Гик, Л.Д. Сейсмическое моделирование сложнопостроенных структур / Л.Д. Гик – Новосибирск: Наука, 1983. – 118 с.
 16. Горбатиков, А.В. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм / А.В. Горбатиков, М.Ю. Степанова, Г.Е. Кораблев // Физ. Земли. – 2008. – № 7. – С. 66-84.

17. Дортман, Н.Б. Петрофизика: Справочник. В трех книгах. Книга первая. Горные породы и полезные ископаемые / Н.Б. Дортман. – М.: Недра, 1992. – 391 с.
18. Еманов, А.Ф. Детальные инженерно-сейсмологические исследования зданий и сооружений стоячими волнами / А.Ф. Еманов, В.С. Селезнев, А.А. Бах, И.А. Данилов, А.П. Кузьменко // Материалы геофиз. конф. Проблемы региональной геофизики: – Новосибирск: ООО “Типография Сибири”, 2001. – С. 51-54.
19. Еманов, А.Ф. Диагностирование потери устойчивости опор трубопроводов по акустическим шумам: лабораторный эксперимент / А.Ф. Еманов, А.А. Каргаполов, Ю.И. Колесников, К.В. Федин // Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. – 2013. – № 4. – С. 84-90.
20. Еманов, А.Ф. Когерентное восстановление полей стоячих волн как основа детального сейсмологического обследования инженерных сооружений / А.Ф. Еманов, В.С. Селезнев, А.А. Бах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – № 3. – С. 20-23.
21. Еманов, А.Ф. Пересчет колебаний фильтрами Винера как основа универсального метода обработки сейсмических волн / А.Ф. Еманов, В.С. Селезнев // Материалы международной геофиз. конф. Проблемы сейсмологии III тысячелетия, г. Новосибирск, 15-19 сент. 2003 г. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. – С. 207-231.
22. Еманов, А.Ф. Пересчет стоячих волн при детальных инженерно-сейсмологических исследованиях / А.Ф. Еманов, В.С. Селезнев, А.А. Бах, С.А. Гриценко, И.А. Данилов, А.П. Кузьменко, В.С. Сабуров, Г.И. Татков // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43. – № 2. – С. 192-207.
23. Еманов, А.Ф. Резонансные свойства верхней части разреза / А.Ф. Еманов, А.А. Красников, А.А. Бах, Е.Н. Черных, А.А. Еманов, А.Ю. Семин, А.В. Черепанов // Физ. мезомех. – 2008. – Т. 11. – № 1. – С. 26-36.

24. Жарков, В.Н. Собственные колебания Земли / Под ред. В.Н. Жаркова. – М.: Мир, 1964. – 316 с.
25. Заалишвили, В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок / В.Б. Заалишвили – М.: Наука, 2009. 350 с.
26. Ивакин, Б.Н. Методы моделирования сейсмических волновых явлений / Б.Н. Ивакин – М.: Наука, 1969. 287 с.
27. Ивакин, Б.Н. Подобие упругих волновых явлений. Ч.І / Б.Н. Ивакин // Изв. АН СССР. Сер геофиз. – 1956¹. – № 11. – С. 1269-1382.
28. Ивакин, Б.Н. Подобие упругих волновых явлений. Ч.ІІ / Б.Н. Ивакин // Изв. АН СССР. Сер геофиз. – 1956². – № 12. – С. 1384-1388.
29. Исакович, М.А. Общая акустика / М.А. Исакович – М.: Наука, 1973. – 496 с.
30. Калиниченко, В.А. Экспериментальное исследование волн Фарадея максимальной высоты / В.А. Калиниченко, С.Я. Секерж-Зенькович // Изв. РАН. МЖГ. – 2007. – № 6. – С. 120-126.
31. Калитеевский, Н.И. Волновая оптика / Н.И. Калитеевский – М.: Высш. шк. 1971. – 376 с.
32. Караев, Н.А. Физическое моделирование порово-трещинных объектов с возможностью тестирования сейсмических технологий / Н.А. Караев, Ю.П. Лукашин, Г.Н. Караев, О.М. Прокатор // Технол. сейсморазведки. – 2010. – № 3. – С. 96-104.
33. Каргаполов, А.А. Диагностика состояния конструктивных элементов по шумовому полю (по данным физического моделирования) / А.А. Каргаполов, К.В. Федин // Материалы 50-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 13-19 апреля 2012 г.): Геология. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2012. – С. 124.
34. Каргаполов, А.А. Методика физического моделирования обследования зданий и сооружений стоячими волнами с использованием поля

- микросейсм / А.А. Каргаполов, К.В. Федин // Материалы XLIX Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 16–20 апреля 2011 г.): Геология.– Новосибирск: Новосибирский ун-т, 2011. – С. 54.
35. Колесников, Ю.И. О детальном изучении резонансных свойств верхней части разреза по микросейсам: данные физического моделирования / Ю.И. Колесников, К.В. Федин, А.Ф. Еманов // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 3. – С. 52-63.
36. Колесников, Ю.И. О диагностике потери устойчивости опор трубопроводов по акустическим шумам / Ю.И. Колесников, К.В. Федин, А.А. Каргаполов, А.Ф. Еманов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012¹. – № 4. – С. 59-67.
37. Колесников, Ю.И. О диагностике состояния конструктивных элементов сооружений по шумовому полю (по данным физического моделирования) / Ю.И. Колесников, К.В. Федин, А.А. Каргаполов, А.Ф. Еманов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012². – № 1. – С. 3-11
38. Колесников, Ю.И. О диагностировании потери устойчивости опор трубопроводов по акустическим шумам / Ю.И. Колесников, К.В. Федин, А.А. Каргаполов // Тез. докл. Всероссийской науч. конф. «Полярная механика-2012» (Новосибирск, 2-9 июня 2012 г.). – Новосибирск, 2012³. – С. 30-31.
39. Колесников, Ю.И. Об определении собственных частот и форм колебаний трубопроводов по акустическим шумам / Ю.И. Колесников, К.В. Федин, А.А. Каргаполов // Интерэкспо Гео-Сибирь-2012: VIII Международная конференция «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых» (Новосибирск, 10-20 апреля 2012 г.): Т. 1. – Новосибирск: СГГА, 2012⁴. – С. 158-162.

40. Колесников, Ю.И. Определение резонансных свойств верхней части разреза по записям микросейсм: данные физического моделирования / Ю.И. Колесников, К.В. Федин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых» (Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.): Т. 2. – Новосибирск: СГГА, 2013. – С. 214-219.
41. Колесников, Ю.И. Применение комплекса сейсмических методов для изучения оползневого склона / Ю.И. Колесников, А.Ф. Еманов, Е.А. Хогоев, А.А. Красников // Интерэкспо Гео-Сибирь-2012: VIII Международная конференция «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых» (Новосибирск, 10-20 апреля 2012 г.): Т. 1. – Новосибирск: СГГА, 2012⁵. – С. 163-167.
42. Колесников, Ю.И. Физическое моделирование акустических волновых полей в скважине с радиальной неоднородностью / Ю.И. Колесников, А.Ю. Игнатов // Геология и геофизика – 1994. – Т. 35, № 3. – С. 137-143.
43. Комаров, С.Ю. Исследование колебаний трубопровода методом цифровой спекл-интерферометрии / С.Ю. Комаров, А.Б. Прокофьев, Ю.Н. Шапошников, Ю.Д. Щеглов // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2002. – Т. 4. – № 1(7). – С. 87-90.
44. Кречмер, С.И. Исследование волновых процессов по методу моделей с применением ультраакустических волн / С.И. Кречмер, С.Н. Ржевкин // Успехи физ. наук. – 1937. – Т. XIII. – Вып. 1. – С. 1-10.
45. Кугаенко, Ю.А. Глубинная структура района Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии по данным микросейсмического зондирования / Ю.А. Кугаенко, В.А. Салтыков, А.В. Горбатилов, М.Ю. Степанова // ДАН. – 2010. – Т. 435. – № 1. – С. 96–101.

46. Лебедев, А.В. Использование метода линейного прогнозирования в ультразвуковой спектроскопии образцов горных пород / А.В. Лебедев // Акустический Журнал. – 2002. – Т. 48. – № 3. – С. 381-389.
47. Лепендин, Л.Ф. Акустика: Учеб. пособие для вузов / Л.Ф. Лепендин – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
48. Линьков, Е.М. Сейсмические явления / Е.М.Линьков – Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. – 247 с.
49. Лужин, О.В. Обследование и испытание сооружений. Учеб. пособие для ВУЗов / О.В. Лужин, А.Б. Злочевский, И.А. Горбунов, В.А. Волохов // Под ред. О.В. Лужина. – М.: Стройиздат, 1987. – 263 с.
50. Мак-Скимин, Г. Ультразвуковые методы измерения механических характеристик жидкостей и твердых тел / Г. Мак-Скимин // В кн.: Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. Т. 1, Часть А. – М.: Мир, 1966. – С. 327-397.
51. Медведев, С.В. Инженерная сейсмология / С.В. Медведев – М.: Госстройиздат, 1962. – 284 с.
52. Меркулова, В.М. Измерение поглощения в горных породах способом изгибных колебаний / В.М. Меркулова, Е.А. Васильцов // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1967. – № 4. – С. 75-77.
53. Меркулова, В.М. Поглощение ультразвуковых волн в горных породах в области частот 10-160 кГц / В.М. Меркулова // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1968. – № 6. – С. 20-25.
54. Методические рекомендации по расчетам конструктивной надежности магистральных газопроводов [Электронный ресурс] –М., 1997. – Режим доступа: <http://stroy.databases.ru/Data1/1/1760/index.htm>, – Загл. с экрана. – 2009.
55. Микер, Т. Волноводное распространение в протяженных цилиндрах и пластинках / Т. Микер, А. Мейтцлер // В кн.: Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. Т. 1, Часть А. – М.: Мир, 1966. – С. 140-203.

56. Назин, В.В. Новые сейсмостойкие конструкции и железобетонные механизмы сейсмоизоляции зданий и сооружений / В.В. Назин – М.: Стройиздат, 1993. – 135 с.
57. Негматуллаев, С.Х. Предварительные результаты испытания опытного образца каркасно-панельного здания сейсмовзрывным воздействием / С.Х. Негматуллаев, К. Рождан, А.Е. Золотарев, А.А. Акишин // Сборник советско-американских работ по прогнозу землетрясений. Т. 2, кн. 2. – Душанбе: «Дониш», 1979. – С. 102-120.
58. Нестеров, С.В. Поперечные колебания трубопровода с равномерно движущейся жидкостью / С.В. Нестеров, Л.Д. Акуленко, Л.И. Коровина // ДАН. – 2009. – Т. 427. – № 6. – С. 781-784.
59. Павленов, В.А. Специфика вибрационных и сейсмовзрывных испытаний сооружений с позиций энергетических показателей воздействий / В.А. Павленов, В.В. Чечельницкий, Ю.А. Бержинский, И.Е. Ицков, Н.Б.Чернов // Развитие сейсмол. и геофиз. исслед. в Сибири и Дал. Вост. (памяти А. А. Трескова). Матер. совмест. засед. секц. МСССС АН СССР по Сибири и Дал. Вост., Иркутск, 18-23 апр., 1986. – Иркутск, 1988. – С. 145-146.
60. Павлов, О.В. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность / О.В. Павлов // Методическое руководство по сейсмическому районированию. – М.: Наука, 1988. – 224 с.
61. Пейн, Г. Физика колебаний и волн / Г. Пейн – М.: Мир, 1979. – 392 с.
62. Потапов, В.А. Инженерно-сейсмологический анализ объемных и поверхностных волн / В.А. Потапов – Новосибирск: Наука, 1992. – 133 с.
63. Прокофьев, А.Б. Расчет собственных частот и форм колебаний трубопроводов с помощью программного комплекса / А.Б. Прокофьев // Изв. Самарского научного центра РАН. – 1999. – № 2. – С. 335-342.

64. Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию (СМР-73). Влияние грунтов на интенсивность сейсмических колебаний. – М.: Стройиздат, 1974. – 65 с.
65. Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 72 с.
66. Рычков, С.П. MSC.visualNASTRAN для Windows / С.П. Рычков – М.: НТ Пресс, 2004. – 552 с.
67. Сафина, Г.Ф. Диагностирование закреплений трубопровода с жидкостью/ Г.Ф. Сафина // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2006. – № 3. – С. 59-60.
68. Сафина, Г.Ф. Диагностирование относительной жесткости подкрепленных цилиндрических оболочек по собственным частотам их асимметричных колебаний / Г.Ф. Сафина // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 12. – С. 55-59.
69. Сейсмическое микрорайонирование. – М.: Наука, 1984. – 236 с.
70. Способ динамических испытаний зданий и сооружений и устройство для его осуществления: Пат. 2141635 Российская Федерация / Н.А. Есенина, В.И. Ларионов, Г.М. Нигметов, И.В. Ситников, В.Н. Сотин, С.П. Сущев, М.А. Шахраманьян, опубл. 20.11.1999¹.
71. Способ динамических испытаний зданий и сооружений: Пат. 2011174 Российская Федерация / Б.В. Багрянов, А.А. Беспав, И.Н. Будников, С.А. Новиков, Л.М. Тимонин, опубл. 15.04.1994.
72. Способ динамических испытаний крупномасштабных конструкций: Пат. 2104508 Российская Федерация / В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов, С.Л. Евстигнеев, опубл. 10.02.1998.
73. Способ определения истинных значений собственных частот колебаний зданий: Пат. 2242026 Российская Федерация / В.М. Острцов, Л.Б. Гендельман, А.Б. Вознюк, С.С., Н.К. Болдырев, Н.К. Капустян, опубл. 10.12.2004.

74. Способ определения физического состояния зданий и сооружений: Пат. 2140625 Российская Федерация / В.С. Селезнев, А.Ф. Еманов, В.Г. Барышев, А.П. Кузьменко, опубл. 27.10.1999².
75. Способ определения физического состояния здания и/или сооружения: Пат. 2365896 Российская Федерация / Ф.Н. Юдахин, Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская, Е.В. Шахова, И.М. Басакина, А.А. Янович, опубл. 27.08.2009.
76. Способ приведения к единому времени регистрации разновременных записей измерений: Пат. 2150684 Российская Федерация / В.С. Селезнев, А.Ф. Еманов, А.П. Кузьменко, В.Г. Барышев, В.С. Сабуров, опубл. 10.06.2000.
77. Стрелков, С.П. Введение в теорию колебаний / С.П. Стрелков – М.: Наука, 1964. – 440 с.
78. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов. Руководящий технический материал РТМ 38.001-94. – М.: ВНИПИнефть, 1994.
79. Федин, К. В. Определение потери устойчивости опор трубопроводов по шумам (по данным физического моделирования) / К. В. Федин // Известия вузов. Горный журнал. – 2013. – № 5. – С. 214-219.
80. Федин, К.В. Влияние неоднородностей на поле стоячих волн конструктивных элементов сооружений / К.В. Федин, А.А. Каргаполов // Проблемы развития газовой промышленности Сибири: Сборник тез. докл. XVII науч.-практич. конф. молодых ученых и специалистов ТюменНИИгипрогаза (Тюмень, 21-25 мая 2012 г.) – Тюмень: ООО ТюменНИИгипрогаз, 2012¹. – С. 217-219.
81. Федин, К.В. Влияние неоднородностей на поле стоячих волн образцов простой формы на примере несущей балки / К.В. Федин, А.А. Каргаполов // Проблемы недропользования 2012 г.: Материалы VI Всероссийской молодежной научно-практической конференции

- (Екатеринбург, 7-10 февраля 2012 г.). – Екатеринбург: УрО РАН, 2012². – С. 201-210.
82. Федин, К.В. Влияние щелевидных дефектов на поле стоячих волн, формирующихся в закрепленной балке под действием акустических шумов / К.В. Федин, А.А. Каргаполов, Ю.И. Колесников // Интерэкспо Гео-Сибирь-2012: VIII Международная конференция «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых» (Новосибирск, 10-20 апреля 2012 г.). Т. 1. – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 88-92.
 83. Федин, К.В. Выделение стоячих волн из микросейсмического поля (по данным физического моделирования) / К.В. Федин, А.А. Каргаполов, А.А. Красников // Материалы V Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (Екатеринбург, 8-11 февраля 2011 г.) – Екатеринбург: УрО РАН, 2011¹. – С. 485-493.
 84. Федин, К.В. Выделение стоячих волн из шума: данные физического моделирования / К.В. Федин, А.А. Каргаполов, Ю.И. Колесников // Труды всероссийской молодежной научной конференции, посвящ. 100-летию академика А. А. Трофимука. Трофимуковские чтения молодых ученых-2011 (Новосибирск, 17-22 октября 2011 г.). – Новосибирск: РИЦ НГУ, 2011². – С. 428-430.
 85. Федин, К.В. Выделение стоячих волн из шумового поля по данным физического моделирования / К.В. Федин, Ю.И. Колесников, А.А. Каргаполов // Тез. докл. Всероссийской конф., посвященной 80-летию акад. М.В. Курлени (с участием иностранных ученых) (Новосибирск, 3-6 окт. 2011 г.) Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. В 2-х т. Т. I. – Новосибирск: Ин-т горного дела СО РАН, 2011³. – С. 157-162.
 86. Федин, К.В. Данные физического моделирования диагностики состояния трубопроводных систем по шумовому полю / К.В. Федин,

- А.А. Каргаполов // Проблемы развития газовой промышленности Сибири: Сборник тез. докл. XVII науч.-практич. конф. молодых ученых и специалистов ТюменНИИгипрогаз (Тюмень, 21-25 мая 2012 г.). – Тюмень: ООО ТюменНИИгипрогаз, 2012³. – С. 219-222.
87. Федин, К.В. Моделирование стоячих волн, формирующихся в верхней части разреза под действием микросейсмических шумов / К. В. Федин // Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых и студентов, посвященной 80-летию академика А.Э. Конторовича «Актуальные проблемы геологии нефти и газа Сибири» (Новосибирск, 10-15 февраля 2014 г.). – [Электронный ресурс].
88. Федин, К.В. Определение резонансных свойств верхней части разреза с использованием малоканальной аппаратуры (данные физического моделирования) / К.В. Федин, Ю.И. Колесников // Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием (Новосибирск, 21-25 октября 2013 г.) «50 лет сейсмологического мониторинга Сибири». – Новосибирск: Изд-во «Полиграфика», 2013. – С. 164-167.
89. Хайкин, С.Э. Физические основы механики / С.Э. Хайкин – М.: Наука, 1962. – 772 с.
90. Харионовский, В.В. Положение по организации и проведению комплексного диагностирования линейной части магистральных газопроводов ЕСГ / В.В. Харионовский, В.М. Ботов, В.И. Городниченко, В.П. Черний, И.Н.Кургнова, Ю.П.Бородин, Б.В. Сидоров, С.С. Фесенко, Н.В. Семин – М.: ОАО «Газпром», 1998.
91. Черных, Е.Н. Зондирование геологической среды через спектрально-корреляционные параметры микросейсмического поля / Е.Н. Черных // Материалы Всероссийского совещания Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия, Иркутск, 18-21 авг., 2009. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. – Т. 1. – С. 206-209.

92. Черных, Е.Н. Оценка сейсмических свойств грунтов по микроколебаниям в условиях естественного микросейсмического фона / Е.Н. Черных // Матер. совмест. засед. секц. МСССС АН СССР по Сибири и Дал. Вост. Развитие сейсмол. и геофиз. исслед. в Сибири и Дал. Вост. (памяти А. А. Трескова), Иркутск, 18-23 апр., 1986. – Иркутск, 1988. – С. 116-117.
93. Шамина, О.Г. Модельные исследования неоднородных и трещиноватых сред / О.Г. Шамина, В.И. Понятовская. – М.: ИФЗ РАН, 1993. – 193 с.
94. Шамина, О.Г. Модельные исследования физики очага землетрясений / О.Г. Шамина. – М.: Наука, 1981. – 192 с.
95. Alsop, L.E. Free Oscillations of the Earth Observed on Strain and Pendulum Seismographs / L.E. Alsop, G.H. Sutton, M. Ewing // J. Geophys. Res. – 1961. – Vol. 66. – № 2. – P. 631-641
96. Anderson, D.L. Earth structure from free oscillations and travel times / D.L. Anderson // Geophys. J. R. Astr. Soc. – 1974. – Vol. 36. – P. 411-459.
97. Asten, M.W. Comment on “Microtremor observations of deep sediment resonance in metropolitan Memphis, Tennessee” by Paul Bodin, Kevin Smith, Steve Horton and Howard Hwang / M.W. Asten // Eng. Geol. – 2004. – Vol. 72. – № 3-4. – P. 343–349.
98. Averbakh, V.S. Acoustic spectroscopy of fluid saturation effects in carbonate rock / V.S. Averbakh, , V.V. Bredikhin, A.V. Lebedev, S.A. Manakov // Acoustical Physics. – 2010. Vol. 56. – № 6. – P. 794–806.
99. Beghein, C. Robust normal mode constraints on inner core anisotropy from model space search / C. Beghein, J. Trampert // Science. – 2003. – Vol. 299. – P. 552–555.
100. Benioff, H. Excitation of the Free Oscillations of the Earth by Earthquakes / H. Benioff, F. Press, S. Smith // J. Geophys. Res. – 1961. – Vol. 66. – № B2. – P. 605-619.

101. Beroza, G.C. Searching for Slow and Silent Earthquakes Using Free Oscillations / G.C. Beroza, T.H. Jordan // J. Geophys. Res. – 1990. – Vol. 95. – № B3. – P. 2485-2510.
102. Birch, F. Velocity and attenuation from resonant vibrations of spheres of rock, glass, and steel / F. Birch // J. Geophys. Res. – 1975. – Vol. 80. – № B5. – P.756–764.
103. Blair, D.P. A direct comparison between vibrational resonance and pulse transmission data for assessment of seismic attenuation in rock / D.P. Blair // Geophysics. – 1990. – Vol. 55. – № 1. – P. 51-60.
104. Bodin, P. Microtremor observations of deep sediment resonance in metropolitan Memphis, Tennessee / P. Bodin, K. Smith, S. Horton, H. Hwang // Eng. Geol. – 2001. – Vol. 62. – № 1–3. – P. 159-168.
105. Bonnefoy-Claudet, S. H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations / S. Bonnefoy-Claudet, C. Cornou, P.-Y. Bard, F. Cotton, P. Moczo, J. Kristek, and D. Fäh // Geophys. J. Int. – 2006. – Vol. 167. – № 2. – P. 827-837.
106. Borchardt, R.D. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay / R.D. Borchardt // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1970. – Vol. 60. – № 1. – P. 29-61.
107. Borchardt, R.D. On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California / R.D. Borchardt, , and G. Glassmoyer // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1992. – Vol. 82. – № 2. – P. 603-641.
108. Born, W.T. The attenuation constant of Earth materials / W.T. Born // Geophysics. – 1941. – Vol. 6. – № 2. – P. 132-148.
109. Bour, M. On the use of microtremor recordings in seismic microzonation / M. Bour, D. Fouissac, P. Dominique, and C. Martin // Soil Dyn. Earthquake Eng. – 1998. Vol. 17. – № 7-8. – P. 465-474.
110. Bretaudeau, F. Small-scale modeling of onshore seismic experiment: A tool to validate numerical modeling and seismic imaging methods / F.

- Bretaudeau, D. Leparoux, O. Durand, O. Abraham // *Geophysics*. – 2011. – Vol. 76. – № 5. – P. T101-T112.
111. Bromwich, T.J. I'A. On the influence of gravity on elastic waves and, in particular, on the vibrations of an elastic globe / T.J.I'A. Bromwich // *Proceedings of the London Mathematical Society (Ser. 1)*. – 1898. – Vol. 30. – P. 98-120.
112. Bruckshaw, G.M. The variation of the elastic constants of rocks with frequency / G.M. Bruckshaw, P.C. Mahanta // *Petroleum*. – 1954. – Vol. 17. – № 1. – P. 14-18.
113. Bu, N. Experimental studies on vibration testing of pipe joints using metal gaskets / N. Bu, N. Ueno, S. Koyanagi, M. Ichiki, O. Fukuda, M. Akiyama // *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on instrumentation, Measurement, Circuits & Systems, Hangzhou, China, April 15-17, 2007*. – pp. 204-209.
114. Bulau, J.R. The role of aqueous fluids in the internal friction of rock / J.R. Bulau, B.R. Tittmann, M. Abdel-Gavad, C. Salvado // *J. Geophys. Res.* – 1984. – Vol. 89. № B6. – P. 4207-4212.
115. Chondros, T.G. Vibration of a beam with a breathing crack / T.G. Chondros, A.D. Dimarogonas, T. Yao // *Journal of Sound and Vibration*. – 2001. – Vol. 239. – Iss. 1. – P. 57–67.
116. Cooper, J.K. The wedge model revisited: a physical modeling experiment / J.K. Cooper, D.C. Lawton, G. F. Margrave // *Geophysics*. – 2010. – Vol. 75. – № 2. – P. T15–T21.
117. De Cacqueray, B. Elastic-wave identification and extraction through array processing: An experimental investigation at the laboratory scale / B De Cacqueray, P. Roux, M. Campillo, S. Catheline, P. Boue // *J. Appl. Geophys.* – 2011. – Vol. 74, Iss. 1. – P. 81–88.
118. Deuss, A. Regional variation of inner core anisotropy from seismic normal mode observations / A. Deuss, J.C.E. Irving, J.H. Woodhouse // *Science*. – 2010. – Vol. 328. – P. 1018–1020.

119. Donato, R.J. Absorption and dispersion of elastic energy in rocks / R.J. Donato, P.N.S. O'Brien, M.J. Usher // *Nature*. – 1962. – Vol. 193. – № 4817. – P. 82-83.
120. Dunn, K.-J. . Sample boundary effect in acoustic attenuation of fluid-saturated porous cylinders / K.-J Dunn // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1987. – Vol. 81. – № 5. – P. 1259-1266.
121. Dunn, K.-J. Acoustic attenuation in fluid-saturated porous cylinders at low frequencies / K.-J. Dunn // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1986. – Vol. 79. – № 6. – P. 1709-1721.
122. Dziewonski, A.M. Solidity of the inner core of the earth inferred from normal mode observations / A.M. Dziewonski, F. Gilbert // *Nature*. – 1971. – № 234. – P. 465-466.
123. El-Ouafi, Bahlous Experimental validation of an ambient vibration based multiple damage identification method using statistical modal filtering / Bahlous El-Ouafi, Smaoui S., H., S. El-Borgi // *Journal of Sound and Vibration*. – 2009. – Vol. 325. – Iss. 1–2. – P. 49-68.
124. Fedin, K.V. The selection standing waves of microseismic field according to the physical modeling / K.V. Fedin // *The 6th International Siberian Early Career GeoScientists Conference: Proceedings of the Conference (9-23 June 2012, Novosibirsk, Russia)*. – Novosibirsk, 2012. – P. 300.
125. Field, E.H. A comparison and test of various site response estimation techniques, including three that are non reference-site dependent / Field, E.H. and K. Jacob // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1995. – Vol. 85. – № 4. – P. 1127-1143.
126. Field, E.H. Earthquake site response study in Giumri (formerly Leninakan), Armenia using ambient noise observations / E.H. Field, A.C. Clement, K.H. Jacob, V. Aharonian, S.C. Hough, P.A. Friberg, T.O. Babaian, S.S. Karapetian, S.M. Hovanessian, and H.A. Abramian // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1995. – Vol. 85. № 1. – P. 349-353.

127. Giardini, D. Three-dimensional structure of the Earth from splitting in free oscillation spectra / D. Giardini, X.-D. Li, J.H. Woodhouse // *Nature*. – 1987. – Vol. 325. – P. 405–411.
128. Gilbert, F. An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra / F. Gilbert, A.M. Dziewonski // *Philos. Trans. R. Soc.* – 1975. – Vol. 278. – P. 187-269.
129. Gosar, A. Microtremor HVSR study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes / A. Gosar// *Eng. Geol.* – 2007. – Vol. 91. – № 2-4. – P. 178-193.
130. Gosar, A. The earthquake on 12 April 1998 in Krn mountains (Slovenia): ground-motion amplification study using microtremors and modelling based on geophysical data / A. Gosar, R. Stopar, M. Car, M. Mucciarelli // *J. Appl. Geophys.* – 2001. – Vol. 47. – № 2. – P. 153-167.
131. Horike, M. Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas / M. Horike // *J. Phys. Earth.* – 1985. – Vol. 33. – № 2. – P. 59-96.
132. Hough, S.E. Sediment-induced amplification and the collapse of the Nimitz freeway / S.E. Hough, P.A. Friberg, R. Busby, E.F. Field, K.H. Jacob, R.D. Borchardt // *Nature*. – 1990. – Vol. 344. – № 6269. – P. 853-855.
133. Huang, Y.M. Natural frequency analysis of fluid conveying pipeline with different boundary conditions / Y.M. Huang, Y.S. Liu, B.H. Li, Y.J. Li, Z.F. Yue // *Nuclear Engineering and Design*. – 2010. – Vol. 240. – P. 461-467.
134. Ishii, M. Normal-mode and free-air gravity constraints on lateral variations in velocity and density of the Earth's mantle / M. Ishii, J. Tromp // *Science*. – 1999. – Vol. 285. – P. 1231–1236.
135. Jena, P.C. Faults detection of a single cracked beam by theoretical and experimental analysis using vibration signatures / P.C. Jena, D.R. Parhi, G. Pohit // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. – 2012. – Vol. 4. – Iss. 3. – P. 1–18.

136. Jones, T. Velocity and attenuation in sandstone at elevated temperatures and pressures / T. Jones, A. Nur // *Geophys. Res. Lett.* – 1983. – Vol. 10. – № 2. – P. 140-143.
137. Kobayashi, N. Continuous excitation of planetary free oscillations by atmospheric disturbances / N. Kobayashi, Nishida K. // *Nature*. – 1998. – Vol. 395. – P. 357-360.
138. Kolesnikov, Y.I. Detailed Study of Near Surface Resonance Properties Using Low Channel Microtremor Measurements: Physical Modelling Data / Y.I. Kolesnikov, K.V. Fedin, A.F. Emanov // *Near Surface Geoscience 2013 – 19th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Bochum, Germany, 9-11 September 2013¹. Conference Proceedings. – [Электронный ресурс]. – We P14.
139. Kolesnikov, Yu.I. Diagnosing of pipeline supports instability using acoustic noise (physical modeling data) / Yu.I. Kolesnikov, K.V. Fedin, A.A. Kargapolov // *Near Surface Geoscience 2012 – 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Paris, France, 3-5 September 2012¹. Conference Proceeding & Exhibitors' Catalogue. – [Электронный ресурс]. – P15.
140. Kolesnikov, Yu.I. On the use of low channel microtremor measurements in seismic microzonation: Physical modelling data / Yu.I. Kolesnikov, K.V. Fedin, A.F. Emanov // *Near Surface Geophysics Asia Pacific Conference*. Beijing, China, 17-19 July 2013². Conference Proceeding. – [Электронный ресурс].
141. Kolesnikov, Yu.I. Potential landslide slope study using active and passive seismic methods / Yu.I. Kolesnikov, E.A. Hoguev, A.F. Emanov, A.A. Krasnikov // *Near Surface Geophysics Asia Pacific Conference*. Beijing, China, 17-19 July 2013³. Conference Proceeding. – [Электронный ресурс].
142. Kolesnikov, Yu.I. Study of potential landslide slope using active and passive seismic techniques / Yu.I. Kolesnikov, A.F. Emanov, E.A. Hoguev, A.A. Krasnikov // *Near Surface Geoscience 2012 – 18th European Meeting*

- of Environmental and Engineering Geophysics. Paris, France, 3-5 September 2012². Conference Proceeding & Exhibitors' Catalogue. – [Электронный ресурс]. – P 53.
143. Laske, G. Limits on differential rotation of the inner core from analysis of Earth's free oscillations / G. Laske, G. Masters // *Nature*. – 1999. – Vol. 402. – P. 66-69.
 144. Lebedev, A.V. Nonlinear acoustic spectroscopy of local defects in geomaterials / A.V. Lebedev, L.A. Ostrovsky, A.M. Sutin // *Acoustical Physics*. – 2005. – Vol. 51. – № 1. – P. 88-101.
 145. Lebedev, A.V. Resonant acoustic spectroscopy of microfracture in a Westerly granite sample / A.V. Lebedev, V.V. Bredikhin, I.A. Soustova, A.M. Sutin, K. Kusunose // *J. Geophys. Research*. – 2003. – Vol. 108. – № B10. – P.1-12.
 146. Lee, U. The spectral element model for pipelines conveying internal steady flow / U. Lee H. Oh // *Engineering Structures*. – 2003. – Vol. 25. – P. 1045-1055.
 147. Lermo, J. The Mexico earthquake of September 19, 1985 — Natural periods of sites in the valley of Mexico from microtremor measurements and strong motion data / J. Lermo, M. Rodriguez, S.K. Singh // *Earthquake Spectra*. – 1988. – Vol. 4. – № 4. – P. 805-814.
 148. Li, B.H. Free vibration analysis of multispan pipe conveying fluid with dynamic stiffness method / B.H. Li, H.S. Gao, H.B. Zhai, Y.S. Liu, Z.F. Yue // *Nuclear Engineering and Design*. – 2011. – Vol. 241. – P. 666-671.
 149. Li, T.X. Natural frequencies of U-shaped bellows / T.X. Li, B.L. Guo, T.X. Li // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 1990. – Vol. 42, Iss. 1. – P. 61-74.
 150. Liu, H.-P. Comparison of phase velocities from array measurements of Rayleigh waves associated with microtremor and results calculated from borehole shear-wave velocity profiles / H.-P. Liu, D.M. Boore, W.B. Joyner,

- D.H. Oppenheimer, R.E. Warrick, W. Zhang, J.C. Hamilton, L.T. Brown // Bull. Seismol. Soc. Am. – 2000. – Vol. 90. – № 3. – P. 666-678.
151. Love, A.E.H. Some Problems of Geodynamics. Cambridge / A.E.H. Love // University Press. – 1911. – 180 p.
 152. MacDonald, G.J.F. A study of the free oscillations of the Earth / G.J.F. MacDonald, N.F. Ness // J. Geophys. Res. – 1961. – Vol. 66. – № 6. – P. 1865-1911.
 153. Mahajan, A.K. Active seismic and passive microtremor HVSr for assessing site effects in Jammu city, NW Himalaya, India – A case study / A.K. Mahajan, A.K. Mundepi, N. Chauhan, A.S. Jasrotia, N. Rai, T.K. Gachhayat // J. Appl. Geophys. – 2012. – Vol. 77. – P. 51–62.
 154. Mao, Q. Experimental studies of orifice-induced wall pressure fluctuations and pipe vibration / Q. Mao, J.H. Zhang, Y.S. Luo, H.J. Wang, Q. Duan // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2006. – Vol. 83. – P. 505–511.
 155. Mathan, G. Study of dynamic response of piping system with gasketed flanged joints using finite element analysis / G. Mathan, N. Siva Prasad // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2012. – Vol. 89. – P. 28-32.
 156. Morig, R. Experimental evidence for the Biot-Gardner theory / R. Morig, H. Burkhardt // Geophysics. – 1989. – Vol. 54. – № 4. – P. 524-527.
 157. Mucciarelli, M. Reliability and applicability of Nakamura's technique using microtremors: an experimental approach / M. Mucciarelli // J. Earthquake Eng. – 1998. – Vol. 2. – № 4. – P. 625-638.
 158. Mukhopadhyay, S. Low cost seismic microzonation using microtremor data: an example from Delhi, India / S. Mukhopadhyay, P. Bormann // Journal of Asian Earth Sciences. – 2004. – Vol. 24. – № 3. – P. 271-280.
 159. Murphy, W.F. III Effect of partial water saturation on attenuation in Massillon sandstone and Vycor porous glass / W.F. Murphy // J. Acoust. Soc. Am. – 1982. – Vol. 71. – № 6. – P. 1458-1468.

160. Murphy, W.F. Seismic to ultrasonic velocity drift: intrinsic absorption and dispersion in crystalline rock / W.F. Murphy // *Geophys. Res. Lett.* – 1984. – Vol. 11. – № 12. – P. 1239-1242.
161. Nahvi, H. Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model / H. Nahvi, M. Jabbari // *International Journal of Mechanical Sciences.* – 2005. – Vol. 47. – Iss. 10. – P. 1477–1497.
162. Nakamura, Y. A. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface / Y. Nakamura // *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute.* – 1989. Vol. 30(1). – P. 2530.
163. Nawa, K. Incessant excitation of the Earth's free oscillations / K. Nawa, N. Suda, Y. Fukao, T. Sato, Y. Aoyama, K. Shibuya // *Earth Planets Space.* – 1998. – Vol. 50. – P. 3-8.
164. Ness, N.F. Observations of the Free Oscillations of the Earth / N.F. Ness, J.C. Harrison, L.B. Slichter // *J. Geophys. Res.* – 1961. – Vol. 66. – № 2. – P. 621-629.
165. Nunziata, C. A physically sound way of using noise measurements in seismic microzonation, applied to the urban area of Napoli / C. A. Nunziata // *Eng. Geol.* – 2007. – Vol. 93. – № 1-2. – P. 17-30.
166. Paffenholz, J. Absorption and modulus measurements in the seismic frequency and strain range on partially saturated sedimentary rocks / J. Paffenholz, H. Burkhardt // *J. Geophys. Res.* – 1989. – Vol. 94. – № B7. – P. 9493-9507.
167. Pandit, B.I. An experimental test of Lomnitz's theory of internal friction in rocks / B.I. Pandit, J.C. Savage // *J. Geophys. Res.* – 1973. – Vol. 78. – № B26. – P. 6097-6099.
168. Pandit, B.I. The variation of elastic wave velocities and quality factor Q of a sandstone with moisture content / B.I. Pandit, M.S. King // *Can. J. Earth Sci.* – 1979. – Vol. 16. – № 12. – P. 2187-2195.

169. Park, J. Earth's Free Oscillations Excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman Earthquake / J. Park, T.-R.A. Song, J. Tromp, E. Okal, S. Stein, G. Roult, E. Clevede, G. Laske, H. Kanamori, P. Davis, J. Berger, C. Braitenberg, M.V. Camp, X. Lei, H. Sun, H. Xu, S. Rosat // *Science*. – 2005. – Vol. 308. – № 5725. – P. 1139-1144.
170. Parolai, S. New relationships between Vs, thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany) / S. Parolai, P. Bormann, C. Milkereit // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 2002. – Vol. 92. – № 6. – P. 2521-2527.
171. Picozzi, M. Site characterization by seismic noise in Istanbul, Turkey / M. Picozzi, A. Strollo, S. Parolai, E. Durukal, O. Özel, S. Karabulut, J. Zschau, M. Erdik // *Soil Dyn. Earthquake Eng.* – 2009. – Vol. 29. – № 3. – P. 469-482.
172. Rial, J.A. The anomalous seismic response of the ground at the Tarzana Hill site during the Northridge 1994 Southern California earthquake: a resonant, sliding block? / J.A. Rial // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1996. – Vol. 86. № 6. – P. 1714-1723.
173. Romanowicz, B. Anomalous splitting of free oscillations: A reevaluation of possible interpretations / B. Romanowicz, L. Breger // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – Vol. 105. – P. 21559-21578.
174. Salley, L. A study of the modal characteristics of curved pipes / L. Salley, J. Pan // *Applied Acoustics*. – 2002. – Vol. 63, Iss. 2. – P. 189-202.
175. Semke, W.H. Efficient dynamic structural response modelling of bolted flange piping systems / W.H. Semke, G.D. Bibel, S. Jerath, S.B. Gurav, A.L. Webster // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2006. – Vol. 83. – P. 767-776.
176. Sentman, D.D. Schumann Resonances / D.D. Sentman // In: *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, Vol. 1, H. Volland, Editor, CRC Press, Boca Raton, USA, 1995, P. 267-298.

177. Singh, S.K. Some aspects of source characteristics of the 19 September 1985 Michoacan earthquake and ground motion amplification in and near Mexico City from strong motion data / S.K. Singh, E. Mena, R. Castro // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1988. – Vol. 78. – № 2. – P. 451-477.
178. Soga, N. Elastic properties of tektites measured by resonant sphere technique / N. Soga, O.L. Anderson // J. Geophys. Res. – 1967. – Vol. 72. – № 6. – P. 1733-1739.
179. Spencer, J.W. Jr. Stress relaxations at low frequencies in fluid saturated rocks: attenuation and modulus dispersion / J.W. Spencer // J. Geophys. Res. – 1981. – Vol. 86. № B3. – P. 1803-1812.
180. Stein, S. Speed and size of the Sumatra earthquake / S. Stein, E. A. Okal // Nature. – 2005. – Vol. 434. – P. 581-582.
181. Sun, C.-G. Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea / C.-G. Sun, D.-S. Kim, C.-K. Chung // Eng. Geol. – 2005. – Vol. 81. – № 4. – P. 446-469.
182. Terada, T. Experimental studies on elastic waves / T. Terada, C. Tsuboi // Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ. – 1927. – Vol. 3. – P. 55-65.
183. Tijsseling, A.S. Fluid–structure interaction and transient cavitation tests in a T-piece pipe / A.S. Tijsseling, A.E. Vardy // Journal of Fluids and Structures. – 2005. – Vol. 20, Iss. 6. – P. 753-762.
184. Tittmann, B.R. Frequency dependence of seismic dissipation in saturated rocks / B.R. Tittmann, H. Nadler, V.A. Clark, L.A. Ahlberg, T.W. Spencer // Geophys. Res. Lett. – 1981. – Vol. 8. – № 1. – P 36-38.
185. Toksöz, M.N. Microseisms: mode structure and sources / M.N. Toksöz, R.T. Lacoss // Science. – 1968. – Vol. 159. – № 3817. – P. 872–873.
186. Tong, Z. Dynamic behavior and sound transmission analysis of a fluid–structure coupled system using the direct-BEM/FEM / Z. Tong, Y. Zhang, Z. Zhang, H. Hu // Journal of Sound and Vibration. – 2007. – Vol. 299. – Pp. 645-655.

187. Tromp, J. Support for anisotropy of the earth's inner core from free oscillations / J. Tromp // *Nature*. – 1993. – Vol. 366. – P. 678-681.
188. Ulrich, T. Determination of elastic moduli of rock samples using resonant ultrasound spectroscopy / T. Ulrich, K. McCall, R. Guyer // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2002, Vol. 111. – P. 1667-1674.
189. White, J.E. Biot-Gardner theory of extensional waves in porous rods / J.E. White // *Geophysics*. – 1986. – Vol. 51. – № 3. – P. 742-745.
190. Winkler, K. Seismic attenuation: Effects of pore fluids and frictional sliding / K. Winkler, A. Nur // *Geophysics*. – 1982. – Vol. 47. – № 1. – P. 1-15.
191. Woodhouse, J.H. Evidence for inner core anisotropy from free oscillations / J.H. Woodhouse, D. Giardini, X.D. Li // *Geophysical Research Letters*. – 1986. – Vol. 13. – P. 1549-1552.
192. Xie, J.H. Modal experiment research on fluid-solid coupling vibration of hydraulic long-straight pipeline of shield machine / J.H. Xie, K. Tian, L. He, T.R. Yang, X.H. Zhu // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – Vol. 105-107. – P. 286-293.
193. Yamanaka, H. Characteristics of long period microtremors and their applicability in exploration of deep sedimentary layers / H. Yamanaka, M. Takamura, H. Ishida, M. Niwa // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1994. – Vol. 84. – № 6. – P. 1831-1841.
194. Yoneda, A. Single-crystal elasticity of stishovite: New experimental data obtained using high-frequency resonant ultrasound spectroscopy and a Gingham check structure model / A. Yoneda, T. Cooray, A. Shatskiy // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2011. – Vol. 190-191. – P. 80-86.
195. Zadler, B.J. Resonant Ultrasound Spectroscopy: theory and application / B.J. Zadler, J.H. Le Rousseau, J.A. Scales, M.L. Smith // *Geophys. J. Int.* – 2004. Vol. 156. – P. 154-169.

196. Zhai, H.B. Dynamic response of pipeline conveying fluid to random excitation / H.B. Zhai, Z.Y. Wu, Y.S. Liu, Z.F. Yue // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Vol. 241. – P. 2744-2749.