

На правах рукописи



ФЕДИН Константин Владимирович

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

25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Колесников Юрий Иванович.

Официальные оппоненты:

Глинский Борис Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск;

Черных Евгений Николаевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Сибирского отделения Российской Академии Наук (ИГД СО РАН, г. Новосибирск).

Защита состоится 28 января 2015 г. в 10 час. на заседании диссертационного совета Д 003.068.03, созданного на базе ИНГГ СО РАН, в конференц- зале.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу:

630090, Новосибирск, пр-т Акад. Коптюга, 3, ИНГГ СО РАН;

Факс: (383) 333-25-13, 330-28-07;

e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНГГ СО РАН и на сайте <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/commettee/Fedin2014>

Автореферат разослан 28 ноября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета, д.г.-м.н., доцент



Н.Н. Неvedрова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 геофизике на разных масштабных уровнях – от резонансных измерений упругих параметров образцов горных пород до изучения собственных колебаний Земли. В инженерной сейсмологии они, в частности, используются при обследовании зданий и сооружений 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; Бержинский и др., 2005]. 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., 2002]. Эта методика реализована в технологии обследования зданий и сооружений, позволяющей по разновременным микросейсмическим данным, записанным в разных точках исследуемых объектов и пересчитанным с помощью фильтров Винера к «единому» времени, определять значения собственных частот и изучать формы стоячих волн, формирующихся в них под действием микросейсмических колебаний.

В последние годы аналог этой методики находит применение и в другой области инженерной сейсмологии – в сейсмическом микрорайонировании [Еманов и др., 2008]. Выделение из зарегистрированного на исследуемом участке микросейсмического поля его когерентных составляющих (стоячих волн) позволяет определять резонансные свойства верхней части разреза (ВЧР).

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], 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] и математическом аппарате, позволяющем выделять когерентные составляющие волновых полей [Еманов и др., 2002], 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.

Для обработки данных сейсмического моделирования применялись разработанные в Алтае-Саянском филиале Геофизической службы СО РАН (АСФ ГС СО РАН) программы, позволяющие преобразовывать разновременные записи в «квазисинхронные» данные и выделять из микросейсмического поля его когерентные составляющие (стоячие волны). При анализе полученных экспериментальных данных широко применялось сопоставление с результатами компьютерного моделирования методом конечных элементов, для чего использовались программные комплексы Abaqus 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.

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 натуральных 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 одновременных 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 «Трофимукские 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).

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения общим объемом 119 страниц, содержит 36 рисунков и 7 таблиц. Список цитируемой литературы включает 196 наименований.

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 подготовке и проведении экспериментов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и научная задача исследования, перечислены защищаемые научные результаты, показана их новизна, определена научная и практическая ценность.

Первая глава является обзорной частью работы, в которой коротко рассмотрен механизм образования стоячих волн и приводятся примеры их применения в геофизике на разных масштабных уровнях – от изучения упругих и поглощающих свойств горных пород в лабораторных условиях до собственных колебаний Земли. Отмечено, что в инженерной сейсмологии наиболее активно стоячие волны используются при обследовании зданий и сооружений, в основном для определения их динамических характеристик [Негматуллаев и др., 1979; Лужин и др., 1987; Павленов и др., 1988; Назин, 1993; Бержинский и др., 2005]. При этом, как правило, для таких исследований в испытуемых конструкциях возбуждают колебания с помощью искусственных источников.

В последние годы получили развитие методы исследования динамических характеристик зданий и сооружений, не предполагающие применения каких-либо искусственных источников для возбуждения стоячих волн (например, методы, предложенные в работах Ф.Н. Юдахина, Н.К. Капустян, В.М. Острцова и др.). Исходными данными для этих методов являются записи микросейсм, иногда дополненные синхронными записями других измерений, например, атмосферного давления или скорости и направления ветра.

Наиболее широко для обследования зданий и сооружений стоячими волнами, выделяемыми из поля микросейсм, применяется методика, разработанная в АСФ ГС СО РАН [Еманов и др., 2002]. Методика основана на пересчете разновременных данных, зарегистрированных малокаанальной аппаратурой на плотной сети наблюдений, к «единому» времени с использованием синхронных записей микросейсм, полученных в опорных точках. Такой пересчет позволяет эффективно выделять из микросейсмического поля его когерентные составляющие, а именно, стоячие волны, формирующиеся в исследуемых объектах в результате воздействия микросейсм. 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].

В последнем разделе главы изложены основные положения метода выделения когерентных составляющих микросейсмического поля на основе пересчета разновременных данных к «единому» времени [Еманов и др., 2002], который применялся в работе при обработке данных физического моделирования.

Во второй главе описана методика проведения экспериментов и представлены результаты физического моделирования изгибных стоячих волн, формирующихся под действием акустических шумов в балках прямоугольного сечения, в том числе с щелевидными дефектами. Схема экспериментов показана на рисунке 1.

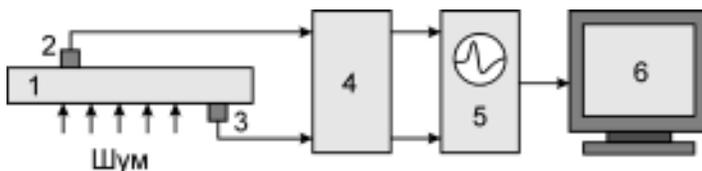


Рисунок 1 - Схема эксперимента: 1 – модель, 2 – передвижной и 3 – опорный ультразвуковые датчики, 4 – усилитель, 5 – цифровой осциллограф, 6 – персональный компьютер

Одна из особенностей разработанной методики состояла в имитации поля микросейсм с помощью дополнительного распределенного источника, так как уровень естественных акустических шумов в лабораторных условиях не превышал по интенсивности собственные шумы аппаратуры и внешние электрические помехи. Возбуждение в моделях дополнительного шумового поля производилось с помощью устройства, работающего по принципу автомобильных стеклоочистителей («дворников») – шум генерировался в результате возвратно-поступательного движения щетки с жесткой щетиной по поверхности исследуемых объектов.

Регистрация акустических шумов осуществлялась с помощью двух ультразвуковых датчиков поршневого типа диаметром 2 мм (моделирующих вертикальные геофоны), 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. Обработка разновременных шумовых данных проводилась по разработанным в АСФ ГС СО РАН программам, в которых реализован упомянутый выше метод выделения когерентных составляющих

микросейсмического поля на основе пересчета разновременных данных к «единому» времени с использованием синхронных записей в опорной точке. С небольшими изменениями описанная методика применялась при проведении всех экспериментов, результаты которых представлены в диссертации.

Эксперименты с моделью незакрепленной прямоугольной балки из бетона длиной 50 см с сечением $3.5 \times 7 \text{ см}^2$ показали, что данная методика позволяет эффективно выделять из зарегистрированного на поверхности балки акустического шумового поля изгибные стоячие волны. При установке датчиков на больших гранях модели регистрировались преимущественно ее колебания по толщине (схематическое изображение в увеличенном масштабе на примере второй моды показано на рисунке 2а), а при расположении датчиков на средних по площади гранях – колебания по ширине (Рисунок 2б).



Рисунок 2 - Схематическое изображение изгибных колебаний балки по толщине (а) и по ширине (б) для второй моды стоячих волн

После обработки шумовых записей длительностью 6.5 с на осредненном по всем точкам наблюдений и по времени амплитудном спектре наблюдается квазипериодическое чередование хорошо выраженных пиков, характерное для стоячих волн (Рисунок 3).

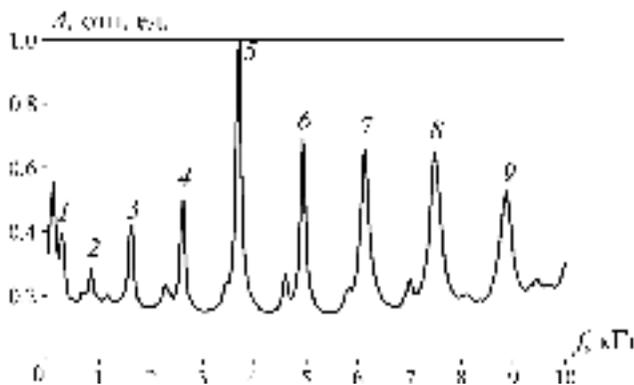


Рисунок 3 - Пример осредненного амплитудного спектра шумового поля в прямоугольной балке. Цифрами отмечены частотные пики соответствующих мод изгибных стоячих волн

Постепенное увеличение интервалов между соседними пиками с ростом частоты обусловлено геометрической дисперсией скорости изгибных волн, которая, как известно, сильно зависит от частоты [Стрелков, 1964; Исакович, 1973]. Для данной модели при изгибных колебаниях 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. Проведенное сопоставление с данными компьютерного моделирования показало, что определенные экспериментально частоты изгибных стоячих волн (собственные частоты) отличаются от рассчитанных методом конечных элементов не более, чем на 2%, а среднее отклонение составило 1.1%.

Одна из главных целей экспериментов, результаты которых приведены в данной главе, – изучение влияния щелевидных дефектов в балках прямоугольного сечения на частоты изгибных стоячих волн. В основной серии экспериментов исследовались собственные частоты балки с закрепленными торцевыми гранями, которую можно рассматривать как модель несущих элементов различных сооружений. Для фиксации торцевых граней балки с теми же размерами ее концы были зацементированы в два блока кубической формы из такого же бетона, масса каждого блока превышала массу балки примерно в 20 раз.

Кроме экспериментов с монолитной закрепленной балкой, были проведены эксперименты с закрепленными балками, в центральной части которых перпендикулярно наибольшей грани образца были пропилены продольные щели шириной 4–5 мм и длиной 6 и 18 см. Частоты восьми мод для этих трех моделей приведены на рисунке 4.

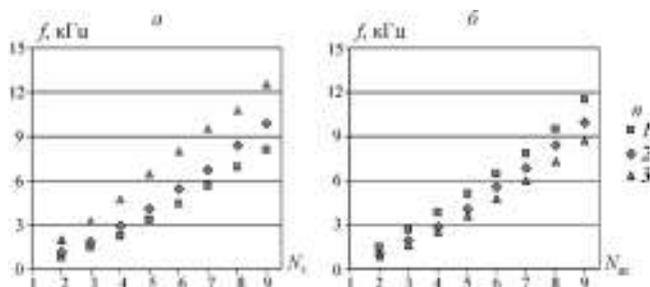


Рисунок 4 - Частоты восьми мод изгибных стоячих волн по толщине (а) и по ширине (б) балки для трех моделей. N_T и N_W – номера мод изгибных колебаний по толщине и ширине, соответственно; f – частота, n – номер модели (1 – монолит; 2 и 3 – продольные щели 6 и 18 см, соответственно)

Согласно полученным результатам, продольные щелевидные дефекты в балке оказывают значительное влияние на собственные частоты изгибных колебаний; и влияние тем больше, чем длиннее щель. При этом, щелевой 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. Эта особенность может служить диагностическим признаком при дефектоскопии конструктивных элементов такого рода.

В третьей главе представлены результаты физического моделирования изгибных стоячих волн в трубопроводах, иллюстрирующие возможность оценки собственных частот и форм колебаний их участков по зарегистрированным на поверхности трубы акустическим шумам. Кроме того, показано, что анализ форм колебаний позволяет однозначно диагностировать потерю устойчивости любой из опор исследуемого участка трубопровода.

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 закреплена хомутами на установленных на массивном основании подставках. В остальном методика экспериментов практически не отличалась от применявшейся при исследовании моделей балок.

Вначале была проведена оценка собственных частот участка пустой трубы между вторым и третьим хомутами. Для этого по шумовым записям, зарегистрированным на профиле наблюдений между хомутами, был рассчитан осредненный по времени и по всем точкам наблюдений амплитудный спектр, на котором отчетливо выделяются пики, соответствующие частотам изгибных стоячих волн.

Как и в экспериментах с моделями балок, на спектре наблюдалось постепенное изменение интервалов между соседними пиками, связанное с геометрической дисперсией скорости изгибных волн. Скорость, оцененная по частотам выделенных в отрезке трубы мод стоячих волн, в диапазоне 0.226–5.26 кГц меняется примерно от 225 до 750 м/с. Экспериментально определенные по шумовым данным собственные частоты жестко закрепленного отрезка трубы хорошо согласуются с данными компьютерного моделирования методом конечных элементов – различия составляют, как правило, менее одного процента.

Частичная потеря устойчивости одной из опор трубопровода имитировалась с помощью тонкой резиновой прокладки, подложенной

на жесткое основание под один из хомутов исследуемого отрезка трубы, а полная потеря устойчивости – удалением этого хомута.

На рисунке 5 показаны распределения амплитудных спектров шумовых данных, пересчитанных к «единому» времени, на одном и том же участке трубы при жестком креплении краев участка (а) и в случае пониженной жесткости правого крепления (б). Чередующиеся вдоль профиля наблюдений максимумы и минимумы на собственных частотах являются, соответственно, пучностями и узлами изгибных стоячих волн.

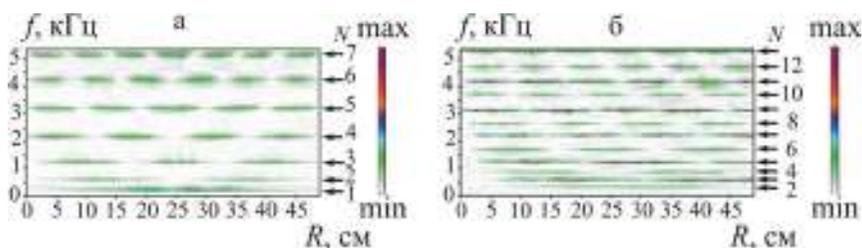


Рисунок 5 - Поле изгибных стоячих волн на участке трубы с жестко закрепленными краями (а) и в случае пониженной жесткости правого крепления (б): f – частота, R – расстояние вдоль профиля наблюдений, N – номер моды изгибных стоячих волн. Цветом показано

изменение амплитуд спектральных составляющих

При жестком креплении опор на краях закрепленного отрезка трубы наблюдаются узлы стоячих волн (Рисунок 5а). Частичная потеря устойчивости правой опоры приводит к увеличению числа мод за счет кажущегося увеличения пролета трубы и к исчезновению некоторых узлов в месте нежесткого крепления. Кроме того, моды с одинаковой полудлиной изгибной волны, которая определяется расстоянием между соседними узлами или соседними пучностями на профиле наблюдений (например, шестая мода на рисунке 5а и двенадцатая мода на рисунке 5б), имеют несколько повышенные частоты в случае нежесткого крепления одного из хомутов в сравнении со случаем двух жестких креплений. Подобные эффекты наблюдаются и при полной потере устойчивости опоры.

Аналогичные результаты получены в экспериментах с трубой, заполненной жидкостью (водой). Таким образом, резкое увеличение числа мод изгибных стоячих волн и исчезновение хотя бы некоторых узлов мод в месте крепления трубы является диагностическими признаками потери устойчивости ее опоры.

Четвертая глава посвящена моделированию стоячих волн вертикального сжатия-растяжения, формирующихся в верхней части разреза под действием микросейсм. На трехмерных физических моделях исследовались возможности детального определения резонансных свойств ВЧР по разновременным микросейсмическим записям, зарегистрированным малоканальной аппаратурой.

Модели в виде параллелепипедов с основанием $25 \times 25 \text{ см}^2$ (Рисунок 6) были изготовлены из трех видов бетона со скоростями продольных волн 1350 (желтый цвет на рисунке), 2760 (зеленый) и 4450 м/с (синий).

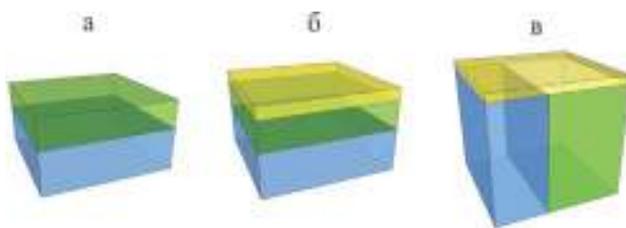


Рисунок 6 - Геометрия моделей: а) двухслойная и б) трехслойная среды; в) слой над вертикальной границей блоков

Методика экспериментов отличалась от использовавшейся при моделировании изгибных стоячих волн в балках и трубах только тем, что в данном случае проводились не профильные, а площадные наблюдения на верхних гранях моделей. Для регистрации шумовых данных использовались те же два датчика поршневого типа (опорный и передвижной), а в результате дальнейшей обработки из шумов выделялись стоячие волны вертикального сжатия-растяжения.

Анализ осредненных спектров шумовых записей, полученных в этих экспериментах, и их сопоставление с результатами компьютерного моделирования методом конечных элементов показали, что резонансные свойства поверхностных слоев фиксированной мощности могут зависеть, в том числе, от поперечных размеров модели и мощности нижележащих слоев. Тем не менее, данные физического моделирования хорошо согласуются с результатами численных расчетов для одних и тех же моделей. В частности, частоты основных резонансов, определенные экспериментально и рассчитанные методом конечных элементов, отличаются не более чем на 1-2 %. Это позволило использовать полученные на физических моделях шумовые данные для верификации

метода детального изучения резонансных свойств верхней части разреза по разновременным записям микросейсм [Еманов и др., 2008].

Обработка экспериментальных данных показала, что пересчет разновременных записей к «единому» времени существенно повышает точность определения амплитуд резонансных пиков. На рисунке 7 показано распределение амплитуд низшей моды стоячих волн сжатия-растяжения на верхней грани модели двухслойной среды (Рисунок 6а), полученное до и после пересчета к «единому» времени. В идеале резонансные свойства однородного слоя должны быть одинаковы на всей площади наблюдений, но из-за нестационарности шума разновременные данные (до пересчета к «единому» времени) дают очень неравномерное распределение амплитуд по площади (Рисунок 7а). После пересчета разброс амплитуд становится на порядок меньше (Рисунок 7б). Подобные результаты получены и на трехслойной модели (Рисунок 6б).

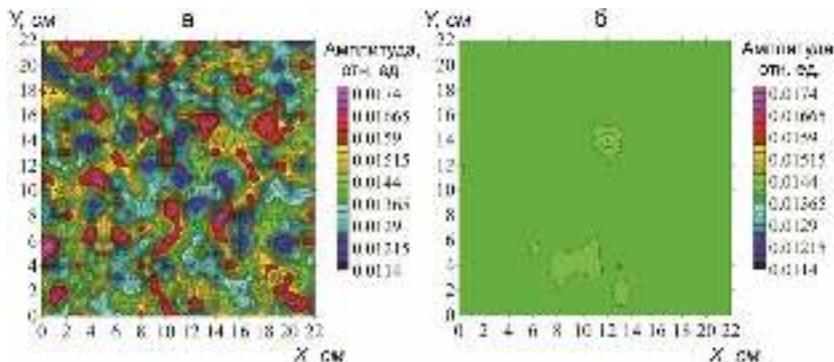


Рисунок 7 - Распределение амплитуд низшей моды стоячих волн на верхней грани модели двухслойной среды до (а) и после (б) пересчета разновременных данных к «единому» времени

Рисунок 8, на котором показано распределение амплитуд низшей моды стоячих волн на верхней грани модели слоя над вертикальной границей блоков (Рисунок 6в), иллюстрирует то, как исследуемый метод позволяет оценить изменение резонансных свойств приповерхностного слоя при смене подстилающей среды. 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). Определенное экспериментально отношение амплитуд низшей моды над двумя подстилающими средами (примерно 0.9), практически совпадает с

отношением, которое дает для этой модели компьютерное моделирование методом конечных элементов.

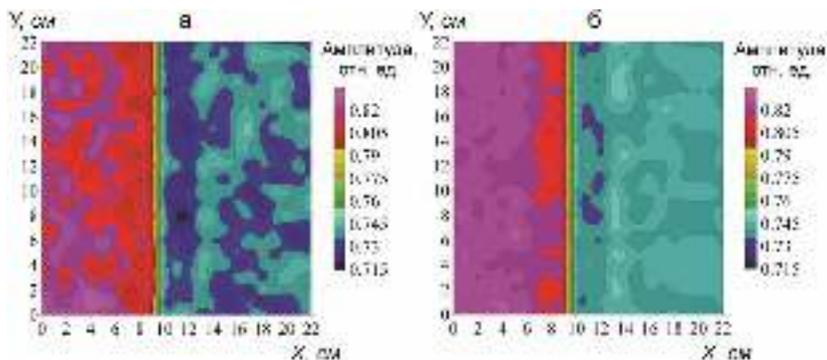


Рисунок 8 - Распределение амплитуд низшей моды стоячих волн на верхней грани модели слоя над вертикальной границей блоков до (а) и после (б) пересчета разновременных данных к «единому» времени. Амплитуды повышены над более жестким блоком

Таким образом, 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. Результаты моделирования подтвердили, что при использовании малоканальной аппаратуры такой пересчет существенно уменьшает погрешности измерений, связанные с нестационарным характером микросейсмического поля.

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 [Еманов и др., 2002].

На примере простых моделей (балок 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи:

1. 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. – 2012. - № 1. – С. 3-11.
2. 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. – 2012. - № 4. – С. 59-67.
3. 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.
4. **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.
5. 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.

Материалы и тезисы конференций:

6. **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, 2011. – С. 157-162.
7. **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.
8. 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, 2012. – С. 158-162.
9. Kolesnikov, Yu.I. Diagnosing of pipeline supports instability using acoustic noise (physical modeling data) / Yu.I. Kolesnikov, **К.В. Fedin**, А.А.

Kargapolov // Near Surface Geoscience 2012 – 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Paris, France, 3-5 September 2012. Conference Proceeding & Exhibitors' Catalogue. – [Электронный ресурс]. – P15.

10. 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.

11. 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 2013. Conference Proceeding. – [Электронный ресурс].

12. 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 2013. Conference Proceedings. – [Электронный ресурс]. – We P14.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать 23.10.2014

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 0,9. Тираж 100. Зак. № 123

ИНГГ СО РАН, ОИТ 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3