

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»
Министерства образования и науки Российской Федерации

На правах рукописи

Фан Чунг Дык

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ПЛОСКОСТНЫХ КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗГИБНЫХ ВОЛН ЛЭМБА**

Специальность 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор
технических наук, старший
научный сотрудник С.Н. Савин

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	13
1.1 Актуальные проблемы обследования здания и сооружений	13
1.2 Современные неразрушающие методы испытаний бетона и каменной кладки	16
1.2.1. Современные неразрушающие методы испытаний бетона, рекомендуемые существующими стандартами	18
1.2.2. Современные неразрушающие методы испытаний каменной кладки	24
1.3. Развитие метода с использованием сейсмических и акустических волн при одностороннем доступе к конструкции.....	27
1.3.1 Импакт-эхо метод	27
1.3.2 Метод поверхностных волн	30
1.4. Выводы главы.....	34
ГЛАВА II. ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЗНАЧИМЫХ ФАКТОРОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗГИБНЫХ ВОЛН В ПЛОСКОСТНЫХ КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ.	36
2.1 Анализ распространения изгибных волн в однородной плите.....	36
2.2 Особенности распространения упругих волн в каменной кладке.....	42
2.3 Влияния параметров плоскостных каменных конструкций на скорости распространения изгибных волн	44
2.4 Влияние длин изгибных волн на результаты обследования плоскостных каменных конструкций.....	49
2.5 Выводы по результатам проведенного анализа	56

ГЛАВА III. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКОСТНЫХ КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗГИБНЫХ ВОЛН	58
3.1 Алгоритм определения акустических характеристик материалов строительных конструкций	58
3.2 Методики создания ударного импульса для возбуждения изгибных волн в плоскостных каменных конструкциях и обработки результатов измерения импульсных реализаций	63
3.2.1. Импульсное возбуждение и измерение изгибных волн в конструкции..	63
3.2.2. Обработка экспериментальных реализаций.....	70
3.3 Методика оценки механических характеристик плоскостных каменных конструкций по дисперсионным кривым и годографам скоростей изгибных волн	73
3.3.1 Определение упругих и прочностных характеристик плоскостных каменных конструкций.....	73
3.3.2 Оценка состояния плоскостных каменных конструкций по их толщине.....	78
3.4 Выводы	80
ГЛАВА IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКОСТНЫХ КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ	82
4.1. Экспериментальная испытательная установка.....	82
4.2. Определение скоростей распространения упругих волн в плоскостных каменных конструкциях существующего здания.....	86
4.3. Оценка прочности кирпичных кладок на реальном объекте	93
4.3.1 Определение прочности кирпичей и раствора кладки.....	93

4.3.2 Сравнительный анализ прочностных характеристик кирпичной кладки, определенных по разработанному методу с использованием изгибных волн и по существующим нормативам	98
4.4. Контроль проектной толщины и оценка упругих характеристик плоскостных каменных конструкций существующих зданий	101
4.4.1. Контроль проектной толщины и оценка упругих характеристик бетонных плит	101
4.4.2. Контроль проектной толщины и оценка упругих характеристик кирпичных стен	105
4.5. Результаты испытаний кирпичных сводов	107
4.6. Перспективы дальнейшего исследования	111
4.7. Выводы	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	116
ПРИЛОЖЕНИЕ	131

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время надежность результатов обследований зданий и сооружений во многом определяется уровнем измерительной аппаратуры и качеством методических приемов, используемых исследователем. Так, при исследовании качеств материалов строительных конструкций задачи оценки механических свойств осложняются ограничениями в доступе к самим конструкциям. Сегодня, когда во всем мире высок уровень урбанизации, здания строятся настолько тесно, что между ними почти не остается места. Доступ к некоторым строительным конструкциям (фундаментным плитам, фундаментным стенам, подпорным стенам ...) может осуществляться полностью только с одной стороны. Это создает существенные препятствия для комплексного обследования строительных конструкций.

С другой стороны, существующие методы неразрушающего контроля имеют серьезные ограничения, связанные, как с надежностью получаемых результатов, так и с невозможностью применения при высоком уровне рассеяния энергии ультразвуковых волн в бетонной плите и каменной кладке. Разрушающий метод дает более точные результаты, но он так или иначе повреждает конструкцию, носит точечный характер и является трудоемким.

Неразрушающие методы, кроме серьезных ограничений по надежности, скорее оценивают механические характеристики материалов конструкций в поверхностном слое. Это также может искажать общую картину их реального состояния. Качество материалов на поверхности конструкции зачастую иногда не одинаково и отличается по всей ее толщине. На поверхности конструкций часто подвергаются значительному влиянию суровых погодных условий, а также воздействия внешних природных явлений. Поэтому необходима разработка новых методов в сочетании с существующими, позволяющая получить больше информации о качестве строительства и обеспечить максимальную точность результатов.

Таким методом на сегодняшний день является метод, использующий упругие волны сантиметрового диапазона частот, которые распространяются в плоских пластинах, как в направлении распространения волны, так и перпендикулярно плоскости пластины и носят название волны Лэмба Г. в честь английского ученого, впервые их описавшего. Волны Лэмба Г. считаются перспективным инструментом для обнаружения локальных мест повреждений и дефектов в конструкциях со свободными границами, поскольку они могут распространяться на большие расстояния с низким затуханием и их параметры сильно зависят от механических характеристик материала. Такие волны в материале конструкций отличаются от ультразвуковых длиной волны, скоростью распространения и интенсивностью затухания. Это отличие, с одной стороны, снижает разрешающую способность основанных на их использовании методов, но с другой — позволяет увеличить базы измерений, а также глубину зондажа при одностороннем доступе к конструкции. Но на данный момент применение изгибных волн в экспериментах все еще имеет множество ограничений с точки зрения разработки методов их возбуждения и измерения параметров, выбора подходящего диапазона длин волн и обработки полученных записей. Поэтому поставленная задача развития метода мониторинга технического состояния плоскостных каменных конструкций с использованием изгибных волн Лэмба является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Экспериментальные исследования по применению неразрушающих методов контроля качества материалов строительных конструкций проводились такими исследователями, как: В.Т. Гроздов, А. Мочко, М. Мочко, В.И. Андреев, С.Н. Савин, А.В. Улыбин, Г.В. Несветаев, Р.Б. Орлович, В.Н. Деркач, Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович, Л.В. Ким, А.С. Семенов, Ю.В. Краснощеков, M. Chekroun, N.J. Carino, C.G. Petersen, M. Guadagnuolo, M. Aurilio, A. Basile, G. Faella, L. Nobile, C. Gentilini, V. Bartolomeo, M. Bonagura и др.

Анализ распространения упругих волн в твердых телах и их характеристик, когда слой распространения в конструкции ограничена двумя плоскостями,

приводится в исследованиях: Г. Лэмба, J. D. Achenbach, И. А. Викторов, Н. Н. Алешин, A. V. Pyashenko, S. V. Kuznetsov, V. Pagneux, A. Maurel, N. Ryden, Ch. B. Park, M. Šofer, P. Ferfecki, P. Šofer, J. Hua, C. Lu, Z. Wang, J. Lin и др.

На практике по применению ультразвуковых волн и акустических волн при обследовании и оценке качества строительных конструкций осуществили следующие учёные: С. Н. Савин, И. В. Ситников, А. В. Улыбин, В. В. Капустин, А. А. Чуркин, И. Д. Смирнов, К. I. Song, C. Hsiao, J. Marazzani, N. Cavalagli, V. Gusella, Y. H. Lee, L. Le Marrec, O. Abraham, C. H. Liew, F. W. Lee, T. Oh, Y. Yang, G. Cascante, M. A. Polak и др.

Научная гипотеза: Использование применяемых в геофизике методов разведки и поиска полезных ископаемых позволяет с помощью волн сейсмоакустического диапазона частот определять механические характеристики материалов плоскостных каменных конструкций при одностороннем доступе.

Цель работы: Развитие метода мониторинга технического состояния плоскостных каменных конструкций с использованием изгибных волн Лэмба.

Задачи исследования:

1. Проанализировать существующие методы с использованием упругих волн в диагностики строительных конструкций.

2. Исследовать влияние основных характеристик (коэффициент Пуассона, модуль упругости, размеры толщины) строительных конструкций на скорости распространения изгибных волн.

3. Разработать математическую модель распространения изгибных волн Г. Лэмба в плоскостных каменных конструкциях.

4. Разработать метод с использованием упругих волн Г. Лэмба для оценки акустических и механических характеристик плитных и стеновых конструкций при одностороннем доступе.

5. Провести экспериментальную проверку метода оценки акустических и механических характеристик каменных конструкций, фундаментов и кирпичных сводов.

Объект исследования: Плоскостные каменные конструкции, бетонные и железобетонные плиты, кирпичные стены и своды.

Предмет исследования: Скорости распространения изгибных волн в плоскостных каменных конструкциях, механические характеристики строительных материалов, метод измерения и обработки полученных результатов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- Рекомендован оптимальный диапазон частот распространения изгибных волн Лэмба в зависимости от размеров плоскостных каменных конструкций для оценки их технического состояния.

- Предложена и обоснована формула определения скоростей Рэлеевской волны в плоскостных каменных конструкциях на основе анализа закономерности распространения изгибных волн Лэмба.

- Разработан метод оценки технического состояния плоскостных каменных конструкций при одностороннем доступе на основе полученных зависимостей скоростей распространения изгибных волн Лэмба от механических характеристик материалов.

Теоретическая значимость работы заключается

- в оценке влияния параметров плоскостных каменных конструкций (коэффициент Пуассона, механические характеристики и размеры толщины) и частот колебаний на скорость распространения изгибных волн в них;

- в оценке состояния материалов плоскостных каменных конструкций по результатам анализа форм дисперсионных кривых скоростей распространяющихся изгибных волн (в зависимости от их длин) и интерполяция результатов (по пред-

ложенной формуле) для определения скорости распространения рэлеевской волны.

Практическая значимость заключается

- в создании измерительного комплекса, разработке программ записи и обработки данных измерений для построения дисперсионных кривых изгибных волн с целью оценки механических характеристик материалов плоскостных каменных конструкций и контроля их проектной толщины.

Методы исследований. В диссертационной работе использованы следующие методы исследования:

1. Сейсмоакустические методы с использованием поверхностных и проходящих продольных сейсмических волн акустического диапазона частот, отличающихся слабым затуханием в материалах конструкций и на границах слоев;
2. Методы обработки и интерпретации измерительной информации, в том числе с помощью математических моделей распространения сейсмических волн в обследуемых конструкциях;
3. Методы динамики строительных конструкций зданий и сооружений.

Область исследования. Соответствует паспорту научной специальности ВАК: 2.1.1 - Строительные конструкции, здания и сооружения, пункт 4 – «Разработка и развитие методов мониторинга, оценки качества и диагностики технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений в период их строительства, эксплуатации и реконструкции».

Степень достоверности результатов обоснована применением известных методов в области разведывательной геофизики, общепринятых понятий, формул и математических моделей распространения волн в твердых деформируемых телах; обеспечена согласованностью полученных результатов с результатами исследований других специалистов; подтверждена хорошей сходимостью с результатами лабораторных испытаний.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель распространения изгибных волн в плоскостных каменных конструкциях с учетом их механических характеристик, размеров толщины и диапазона измерительных волн.
2. Метод изгибных волн для неразрушающего контроля плоскостных каменных конструкций, включающий в себя процедуру возбуждения, измерения, обработки и анализ изгибных волн.
3. Построения и анализа результатов теоретических моделей дисперсионных кривых изгибных волн с экспериментальными результатами с целью оценки скоростей распространения упругих волн в плоскостных каменных конструкциях.
4. Сопоставление результатов обследования на объекте, выполненных по разработанной методике, с экспериментальными исследованиями по действующим нормативам.
5. Результаты обработки данных полевых испытаний для оценки механических характеристик плоскостных каменных конструкций по их толщине при только одностороннем доступе.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы представлены и получили одобрение на следующих конференциях: VII Всероссийская научно-практическая конференция «Инженерное дело на Дальнем Востоке России», г. Владивосток, 2023 г.; XXVI Научно-методическая конференция «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций», г. Санкт-Петербург, 2023 г.; XVI Международная научно-техническая конференция «Актуальные вопросы архитектуры и строительства», г. Новосибирск, 2023 г.; LXXVI Региональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы современного строительства», г. Санкт-Петербург, 2023 г.; III International Scientific and Practical Conference "Technologies, Materials Science and Engineering" (EEA-III 2024), г. Душанбе, Таджикистан, 2024 г.; XXVII International Scientific Conference "Construction the formation of living environment", г. Ереван, Армения, 2024 г.; X Международная научно-практическая конференция

«устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт», г. Тамбов, 2024 г.

Публикация. Основные материалы диссертации опубликованы в 9 научных работах, в том числе - 6 научных статей в журналах из перечня ВАК, и 1 статья в издании, индексируемой международной базой данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложение. Общий объем составляет 134 страницы машинописного текста. В данный объем содержит 62 рисунков, 15 таблиц, библиографический список из 128 источников.

Во введении обоснована актуальность, показана степень разработанности темы диссертации, определены цель и задачи исследования, сформированы научная новизна, научная и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации, структуре и объеме диссертации.

В первой главе выполнен анализ современного состояния исследуемой темы, основные настоящие проблемы при обследовании здания и сооружений. Дан обзор теоретических, экспериментальных и аналитических исследований методов контроля бетона и каменной кладки. Также рассмотрено развитие метода с использованием сейсмических и акустических волн на данный момент.

Во второй главе представлены результаты теоретических, аналитических и экспериментальных исследований влияния различных факторов на распространения изгибных волн в плоскостных каменных конструкциях. По результатам исследований получены теоретические модели для оценки механических характеристик строительных материалов, а также необходимые данные для разработки методов проведения испытаний и обработки результатов.

В третьей главе рассмотрен алгоритм определения акустических характеристик материалов методом с использованием изгибных волн. Предложены методики проведения возбуждения для измерения изгибных волн в плоскостных ка-

менных конструкциях и обработки экспериментальных реализаций. На основе этих данных и других результатов известных ученых разработана методика оценки плоскостных каменных конструкций по дисперсионным кривым и графикам скоростей распространения изгибных волн.

В четвертой главе приводятся результаты опытной апробации разработанной методики с использованием изгибных волн. Определены акустические характеристики строительных материалов. На основе этого проведены оценки прочностных характеристик кирпичной кладки подтверждены способность контроля проектной толщины и оценки упругих характеристик по толщине конструкции при доступе только с одной стороны. Намечены существующего объекта. По предложенной методике экспериментальные исследования направления дальнейших исследований.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю – д.т.н., профессору Савину С.Н., и сотрудникам кафедры «Железобетонных и каменных конструкций» СПбГАСУ под руководством к.т.н., доцента Хегая А.О. за помощь, советы, замечания и рекомендации по диссертационной работе!

I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В главе проанализированы основные проблемы, возникающие при обследовании здания и сооружений. Дан обзор теоретических, экспериментальных и аналитических исследований неразрушающих методов оценки механических характеристик бетона и каменной кладки. В заключении проведен анализ состояния вопроса по использованию геофизических методов для оценок свойств материалов строительных конструкций.

1.1 Актуальные проблемы обследования здания и сооружений

На сегодняшний день существует большое количество старых зданий и сооружений. Многие из этих объектов давно выработали проектный ресурс эксплуатации и нуждаются в оценке состояния их несущих конструкций и определении их фактической безопасности на данный момент. Но при их обследовании возникает множество сложных задач и проблем, особенно в части, касающейся труднодоступных мест (фундаментные плиты, подпорные стены, фундаментные стены, плиты перекрытия, ...), каменной кладки различного состава, а также для многослойных конструкций [54, 74]. Ко многим из этих конструкций доступ возможен только с одной стороны (см. рис.1.1, 1.2). Все это является существенным препятствием для проведения комплексного обследования и оценки механических характеристик конструкций, поэтому очень сложно найти решения для реконструкций либо усиления. Поскольку эти конструкции являются одним из самых уязвимых и сложных частей для проверки, и, как правило, требует строгой оценки состояния материалов (их прочность, отсутствие или наличие локальных дефектных зон, соответствие толщины проектной). В связи с этим возникает необходимость в

дальнейшем развитии современных методов оценки упругих и прочностных характеристик их материалов.



Рисунок 1.1. Фото зданий на улице в столице Ханое Вьетнама (vn.sonomu.vn - 17/01/2023), как образец труднодоступности для обследования несущих конструкций



Рисунок 1.2. Подпорная стена для удержания грунтовой массы (stroiznania.ru – 03/01/2025)

Контроль качества строительных материалов, изделий и конструкций производится двумя основными способами.

- По разрушающему способу стандартные образцы из стали, бетона и других конструкционных материалов подвергаются воздействию внешних сил с возрастающими значениями на каждом уровне до тех пор, пока образец не разрушается. Под действием внешней силы материал в образце будет деформироваться в соответствии с величиной напряжений, вызванных уровнями воздействия на образец. При испытании моделей конструкций и их фрагментов возможно доведение до предельного состояния. Что же касается реальных объектов, то их разрушение для определения предельной несущей способности не всегда оправдано.

- Неразрушающий контроль, относящийся к испытаниям неразрушающими методами, которые позволяют сохранить эксплуатационную пригодность исследуемого объекта, не нарушая целостности строительных конструкций и их несущей способности. Данный метод является наиболее эффективным для обследования зданий и сооружений, находящихся в эксплуатации. По неразрушающим методам возможно, например, выявлять дефекты конструкций, обнаружить неоднородность стали и бетона, определять плотность и прочность бетона в изделиях.

В связи с проблемой с точки зрения экономики чтобы уменьшать трудозатраты человек-часов и не повлиять на процесс эксплуатации здания и сооружения при их обследовании, развитие различных современных неразрушающих методов является весьма важным и неизбежным [73, 89, 91]. Т.к разрушающие методы контроля затруднительно применять в условиях эксплуатации, поскольку они требуют механической или другой обработки испытываемого образца, часто используют крупногабаритные, испытательные машины. Кроме того, эти испытания весьма трудоемки и могут проводиться только работниками высокой квалификации. В связи с безопасностью, качеством обследуемых конструкций и требованием заказчика, испытательные образцы отбираются только из не несущих конструкций. Так что иногда надежность таких результатов далека от реальности.

Несмотря на множество преимуществ, большинство неразрушающих методов также имеют некоторые ограничения и недостатки. Обычно эксперименты с использованием неразрушающих методов нам дают косвенные результаты, поэтому надежность, достоверность их не очень высока. И эти результаты оцениваются только для отдельных точек либо верхних слоев конструкций [101]. Зачастую это не полностью отражает все характеристики, а также свойства материалов всей обследуемой конструкции. До настоящего времени в соответствии с существующими рекомендациями прочность наружных стен определялась только в ее поверхностном слое [83]. Кроме того, для правильной и полной оценки технического состояния зданий и сооружений также следует учитывать ограниченный доступ к некоторым элементам конструкций (фундаментные стены, стены и плиты перекрытий и покрытия, полы по грунту). Проблема разработки методов неразрушающего контроля, которые позволили бы преодолеть все эти недостатки, давая возможность одновременно получать большой объем результатов испытаний с допустимой достоверностью на протяженных участках измерений (даже при одностороннем доступе к конструкции), очень актуальна и требует эффективного решения.

1.2 Современные неразрушающие методы испытаний бетона и каменной кладки

Бетон и каменная кладка уже давно стали популярными строительными материалами благодаря своей доступности, прочности и долговечности. Поэтому важно тщательно учитывать вопросы контроля качества (с точки зрения упругих и прочностных характеристик) и оценки их состояния (характер размера повреждений, трещин, зоны расслоения). Потому что со временем негативное воздействие окружающей среды или производственной деятельности человека значительно снижает качество и долговечность конструкций. В настоящее время

для решения вышеуказанных проблем постепенно разрабатывается множество различных типов неразрушающих методов.

Согласно с ГОСТ [65] неразрушающие способы контроля качества строительных материалов конструкций возможно классифицировать по типу физического воздействия на конструкции.

- Магнитные методы основаны на анализе магнитного поля, присутствующих или создаваемых в контролируемом объекте, для выявления дефектов либо определения магнитных свойств обследуемого объекта [38];
- Акустические методы, основанные на основе измерения и анализа параметров упругих колебаний, возбуждаемых и (или) возникающих в контролируемом объекте [53, 69, 84];
- Тепловой контактный метод основан на изучении теплового потока, получаемого контролируемым объектом при непосредственном контакте с источником тепла [65];
- Электрические методы, основанные на регистрации и анализе параметров электрического поля, взаимодействующего с изучаемым объектом (оценки емкости, электроиндуктивности, и электросопротивления) [92];
- Оптические методы испытаний конструкций, основанные на исследовании проходящих и отраженных световых излучений при воздействии оптического излучения с объектом контроля [51];
- Радиоволновые методы, основанные на анализе взаимодействия электромагнитного излучения радиоволнового диапазона с объектом контроля [87, 92];
- Метод проникающих сред, основанный на регистрации проникновения жидких веществ в полости на поверхности объекта контроля с целью их выявления [81];

- Радиационные методы основаны на анализе параметров проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом [68, 84, 99];

Кроме вышеуказанных методов на сегодняшний день широко применяется специфическая группа механических методов испытания строительных материалов. Эти методы основаны на связи между прочностью материала, твердостью поверхностного слоя с силами сцепления в нем [4, 27, 47, 103, 106]. Наиболее распространенными являются метод упругого отскока, метод отрыва, метод вырубки образцов, метод скалывания ребра, метод пластических деформаций.

1.2.1. Современные неразрушающие методы испытаний бетона, рекомендуемые существующими стандартами

Как известно, исследования испытаний бетона должны выполняться по требованиям ГОСТа. Условно все применяемые неразрушающие методы можно разделить на 2 группы, представленные на рис. 1.3.

Согласно ГОСТ 22690-88 п.4.4. Основные требования для методов неразрушающего контроля (число испытаний на одном участке, расстояние между местами испытаний на участке и от края конструкции, толщина конструкции на участке испытания должны быть не меньше значений, приведенных в таблице 1.1)

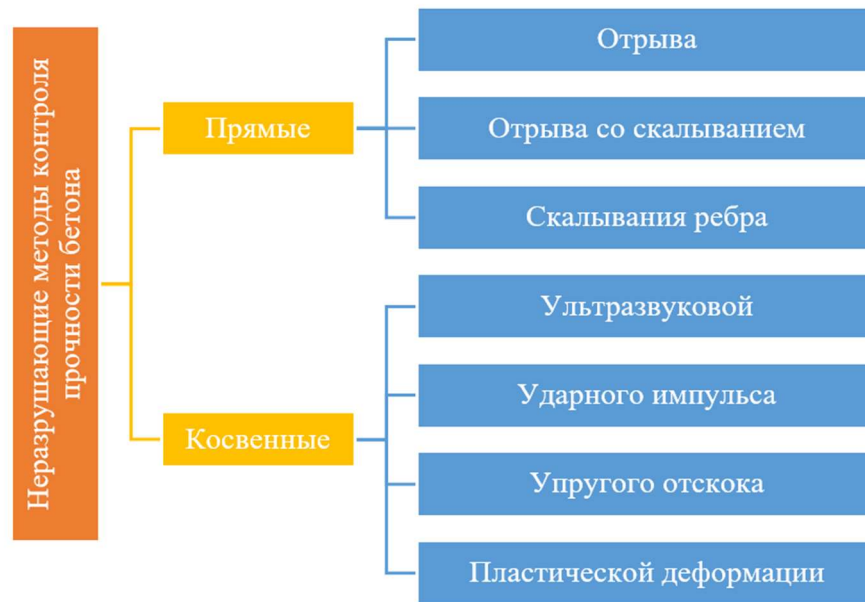


Рисунок 1.3. Основные методы контроля бетона

Таблица 1.1 - Основные требования для методов неразрушающего контроля

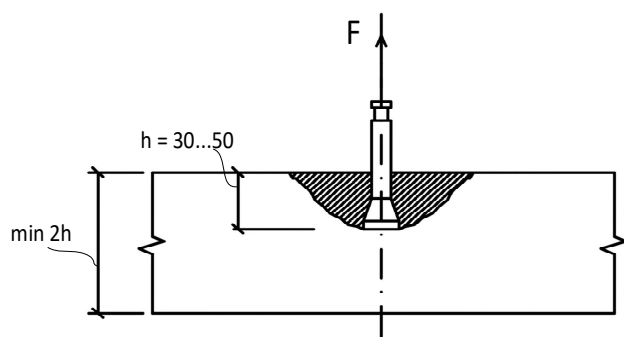
Наименование метода	Число испытаний на участке	Расстояние между местами испытаний, мм	Расстояние от края конструкций до места испытаний, мм	Толщина конструкций
Упругий отскок	5	30	50	100
Ударный импульс	10	15	50	50
Пластическая деформация	5	30	50	70
Скалывание ребра	2	200	-	170
Отрыв	1	2 диаметра диска	50	50
Отрыв со скалыванием	1	5 глубин вырыва	150	Удвоенная глубина установки анкера

В настоящее время задачи, связанные с оценкой прочности бетона неразрушающими методами, рассмотрели многие исследователи: А. Мочко, М. Мочко, В.И. Андреев [1], А.В. Улыбин, С.Д. Федоров [27, 28], Г.В. Несветаев, А.В. Коллеганов, Н.А. Коллеганов [33], Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович, Л.В. Ким [82], А.С.

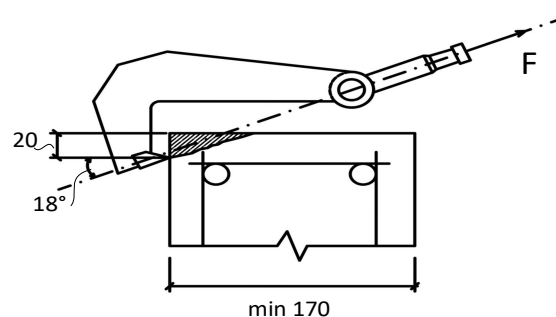
Семенов [57], А.В. Вознищик [78], А.В. Бучкин, А.Н. Патраков [101], Ю.В. Краснощеков [95], А.Т. Moczko, N.J. Carino, C.G. Petersen [42], Л.М. Добшиц, А.В.Белов, А.Л. Клибанов [107].

Прямые методы контроля бетона (см. рис. 1.4) [27, 61] условно считаются неразрушающими, поскольку, хотя они не разрушают бетонные конструкции полностью, они так или иначе вызывают повреждения этих конструкций. Это может повлиять на прочность конструкции в целом и на ее несущую способность, но это значительно более щадящая процедура, чем, если бы использовались разрушающие методы проверки прочности бетона. Основная причина их популярности заключается в том, что они дают более высокую точность результатов, которые затем применяют для составления зависимостей при необходимости перехода к косвенным методам проверки, при этом конструкция не повреждается. При использовании прямых методов характеристики бетона мгновенно видны, и нет значительных ошибок или погрешностей.

а)



б)



в)

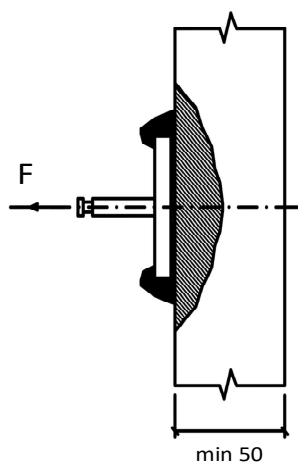


Рисунок 1.4. Прямые методы для оценки прочности бетона

а) метод отрыва со скалыванием; б) метод скалывания ребра; в) метод отрыва металлического диска

Отрыв со скалыванием [42, 76, 95] — это метод измерения силы, необходимой для разрушения бетона во время вырывания анкера из него. Основные преимущества включают высокий уровень точности и наличие градуировочных зависимостей по ГОСТу. А недостатки - трудоемкость и невозможность использования для оценки густоармированных и тонкостенных сооружений.

Отрыв металлического диска [11, 61] — цель этого метода – фиксировать усилие, которое разрушает бетон в момент отрыва от него металлического диска. Этот метод широко использовался в советское время. Достоинства метода – способность проверять густоармированные железобетонные конструкции, недостатки – требует предварительной подготовки (за 3 – 24 часа до начала испытания). Сегодня из-за перепада температурного режима он становится все менее эффективным.

Метод скалывания ребра [11, 61] — основан на оценке силы, которая необходимо для скалывания бетонной конструкции в ее углу. Главным преимуществом этого подхода является его простота и отсутствие предварительной подготовки. Тем не менее, следует отметить, что этот метод не применим к поврежденным бетонным монолитам или конструкциям толщиной менее 17 сантиметров. В настоящее время данный метод используется для определения прочности таких линейных конструкций, как балки, колонны и сваи квадратного сечения.

Несмотря на высокую точность, прямые методы имеют ряд недостатков. К основным недостаткам, связанным с местным разрушением при измерении прочности бетона, относятся необходимость тщательной подготовки, высокая трудоемкость и предварительные испытания, необходимые для определения наличия арматуры в конструкции, частичное повреждение поверхности монолита. Все эти повреждения могут повлиять на эксплуатационные свойства бетона, хотя и незначительно.

Косвенные методы контроля бетона могут быть названы полностью неразрушающими, в отличие от прямых методов. Они не влияют на тестируемую конструкцию или ее несущие характеристики. Большая погрешность результатов яв-

ляется одним из недостатков косвенных методов проверки характеристик бетона. Таким образом, при проверке строительных объектов часто используются косвенные методы в сочетании с прямыми методами. Примеры основных приборов для измерения прочности по этим методам представлены в рисунке 1.5.

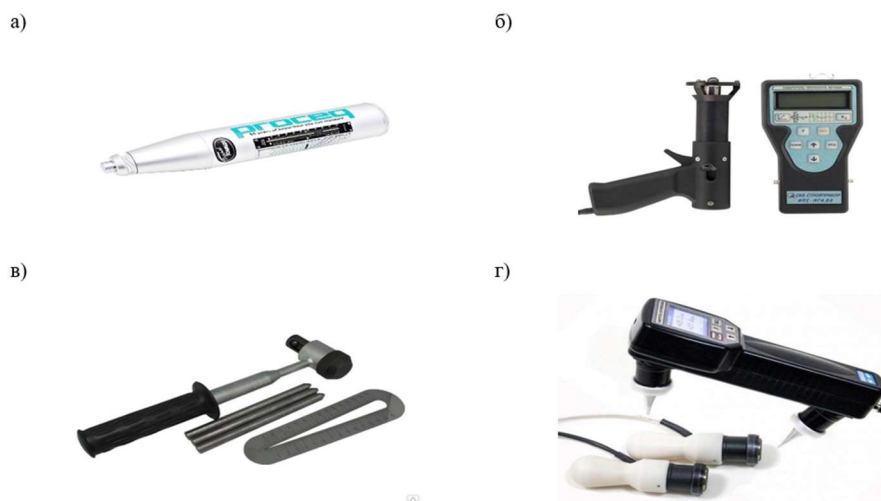


Рисунок 1.5. Приборы для испытания прочности бетона косвенными методами

а) прибор Шмидта; б) прибор измерения методом ударного импульса
в) молоток Кашкарова; г) ультразвуковой прибор

Метод упругого отскока [101, 124] – основан на зависимости между прочностью бетона и величиной отскока бойка устройства от поверхности конструкции. Экспериментальные исследования проводятся с использованием молотка Шмидта. Молоток можно использовать на горизонтальных, вертикальных и наклонных поверхностях при условии, что он перпендикулярен поверхности испытываемой конструкции. Этот измерительный инструмент имеет массу около 2 кг и используется как в лаборатории, так и на реальных объектах.

Проведение испытания с использованием молотка Шмидта – простой, быстрый и доступный метод исследования. Однако данный метод не лишен недостатков [105]. Во-первых, этот подход не обеспечивает абсолютной точности. Во-вторых, прочность может быть измерена только на поверхностном слое материала толщиной 2-3 сантиметра. На точность результатов влияет множество перемен-

ных. К ним относятся гладкость поверхности, тип бетона, содержание влаги и степень карбонизации поверхности.

Испытание на ударный импульс [27, 101] – в основе этого метода лежит корреляция между прочностью бетона и изменением энергии удара объекта, воздействующего на бетонную поверхность. Этот метод применяется для бетона толщиной более 5 сантиметров. Перед проведением испытания необходимо обеспечить тщательную очистку бетонной поверхности. Как правило, в комплект прибора входят специализированные абразивы, облегчающие этот процесс.

Для достижения результатов испытаний с помощью этого метода необходим градуировочный график для данного типа бетона. Заметным преимуществом данного метода является возможность измерения прочности в диапазоне от 5 до 150 МПа с минимальным воздействием на поверхность бетона. Однако следует отметить, что его применение в основном ограничено мониторингом внешнего слоя бетона, с максимальной глубиной залегания до 5 сантиметров.

Метод пластической деформации [27, 61]: это испытание измеряет твердость поверхности бетона, измеряя след стального шарика, встроенного в молоток. Молотки перпендикулярно наносят необходимые удары на поверхности конструкции. Следующим шагом является измерение отпечатка на бетонной поверхности и бойке. Данные записываются и вычисляется среднее значение. Прочность определяется по соотношению размеров.

Метод простой и быстрый. Он может использоваться в бетонных объектах с арматурной сеткой. Но не обошлось без недостатков. Они включали не только недостоверность в методе, поскольку он исследует только внешний слой бетона, но и отсутствие возможности использовать метод оценки прочности бетона, предназначенного для выдерживания нагрузки более 500 кг.

Не разрушающий ультразвуковой контроль [27, 28, 69] является наиболее распространенным методом косвенного неразрушающего контроля бетона непосредственно на объекте. Испытания проводятся с использованием специализированного оборудования, состоящего из генератора импульсов и приемника. Этот метод основан на измерении времени прохождения ультразвуковых волн через

слой бетона. Ультразвуковые испытания проводятся как в полевых условиях, а также в лаборатории на стандартных образцах.

На точность измерений влияет несколько факторов, таких как:

- + Поверхность бетона должна быть гладкой, чтобы обеспечить лучший контакт между датчиками и конструкцией;
- + Наличие арматуры в бетонной конструкции;
- + При поверхностном прозвучивании длина пути должна быть не менее 10 см, но не более 40 см в зависимости от мощности волны.

Таким образом, общие выводы сводятся к тому, что основные неразрушающие методы имеют много преимуществ при оценке состояния бетона, но при этом они также обладают и рядом недостатков. Самым большим минусом у всех методов является возможность измерений прочности только на поверхностях и ребре конструкций. Следовательно, чтобы значения прочности, полученные неразрушающими методами, были достоверными, перед испытаниями необходимо удалить поверхностный слой бетона. Это занимает много времени, трудоемко и, как правило, неэкономично.

1.2.2. Современные неразрушающие методы испытаний каменной кладки

Согласно с нормативом [60], прочность при сжатии и начальный модуль деформаций каменных кладок определяется по эмпирической зависимости, полученной профессором Л.И. Онищиком [10]:

$$R_u = AR_1 \left(1 - \frac{a}{b + \frac{R_2}{2R_1}}\right) \gamma \quad (1.1)$$

Где: R_u , R_1 , R_2 - пределы прочности при сжатии кладки, кладочного элемента, раствора соответственно, МПа; γ – поправочный коэффициент для кладки на низких растворах; A – конструктивный коэффициент, зависящий от вида кладочного элемента;

$$A = \frac{100 + R_1}{100m + nR_1}$$

a, b, m, n – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида кладки;

$$E_0 = \alpha R_u \quad (1.2)$$

E_0 – начальный модуль деформаций каменных кладок; α – упругая характеристика кладки.

В соответствии с требованиями Eurocode 6 [62] представлена формула для определения нормативного сопротивления сжатию кладки по результатам испытаний прочностей составляющих:

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3} \quad (1.3)$$

где f_k – нормативное сопротивление сжатию каменной кладки, Н/мм²; K – константа, зависящая от вида кладочного элемента; f_b – приведенное (нормализованное) сопротивление сжатию камня (блока) в направлении нагрузки, Н/мм²; f_m – прочность кладочного раствора на сжатие, Н/мм².

В этом случае для приблизительного определения прочности кирпича и растворов в кладке используется ряд неразрушающих методов контроля. В соответствии с нормативом [70] существует метод, использующий ультразвуковые волны, однако он применяется только для силикатных кирпичей и камней. На сегодняшний день оценки прочностных характеристик раствора и кирпичей широко проводятся с помощью метода ударного импульса [8, 36, 47]. Ударно-импульсный и ультразвуковой методы оценивают физико-механические свойства кирпичей и раствора на поверхности кладки, при этом по толщине конструкций, эти показатели могут существенно разниться по разным причинам (циклические процессы заморозки и оттаивания, частные резкие перепады влажности и температурного режима, эрозия неблагоприятных факторов). Поэтому практика исследования показывает, что точность определения прочности по показателям составляющих этой методикой невысока [17, 90].

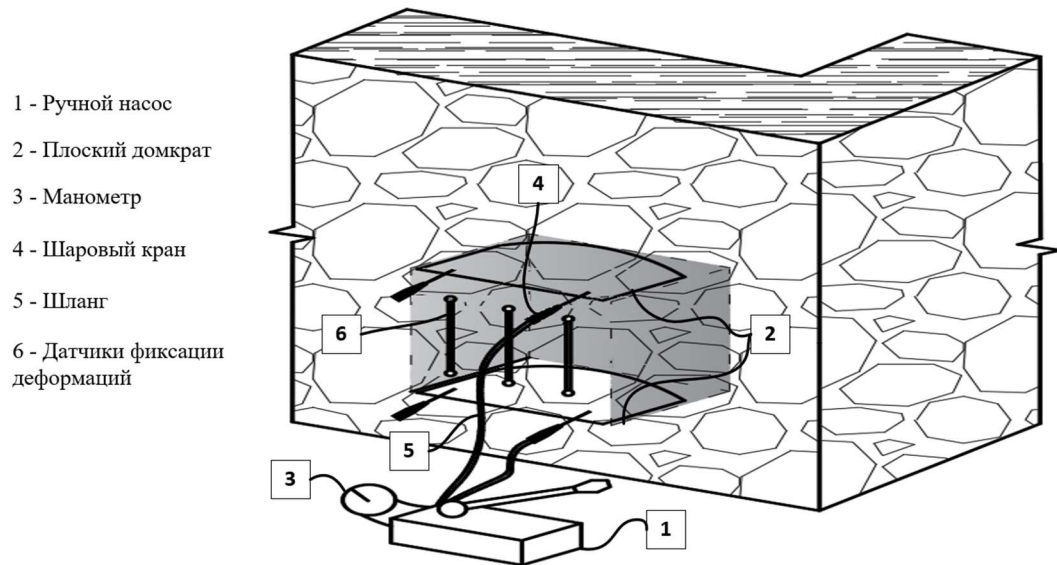


Рисунок 1.6. Метод испытания каменной кладки с помощью метода «Flat-Jack-Tests»

В разных работах С.В. Зубкова, А.В. Улыбина, С.Д. Федотова [21-22], М. Guadagnuolo, М. Aurilio, А. Basile, G. Faella [16], А. Carpinteri, S. Invernizzi, G. Lacidogna [41], L. Nobile, С. Gentilini, V. Bartolomeo, М. Bonagura [55] предлагается использоваться метод плоских домкратов (рис. 1.6). Большинство ученых считали, что наиболее достоверные данные о характеристиках кладки дает метод с помощью плоского пресса (Flat-Jack-Tests) является наиболее надежным способом сбора данных для определения характеристики каменной кладки. Тем не менее, существенные препятствия, ограничивающие его использование, заключаются в том, что метод в значительной степени нарушает целостность испытываемого участка кладки, а также в относительно высоких расходах на оборудование и работы [17].

Проведенное сравнение различных методов не направлено на поиск наиболее эффективного среди них. Главная цель проведенного анализа — выяснить их преимущества и недостатки, чтобы разработать новый метод, который позволил бы преодолеть имеющиеся недостатки и дал качественно новые результаты, позволяющими судить о работе обследуемых конструкций непосредственно на объекте.

1.3. Развитие метода с использованием сейсмических и акустических волн при одностороннем доступе к конструкции.

Основное отличие сейсмических и акустических волн от ультразвуковых заключается в частоте колебаний и, соответственно, длине волн. Метод с использованием волн сейсмических и акустических диапазонов частот показал свою эффективность благодаря способности использовать волны с малым затуханием в материале конструкций по сравнению с ультразвуковым методом. Это позволяет одновременно получать большой объем данных на протяженных измерительных створах даже при одностороннем доступе к конструкции, что раньше было практически невозможно и относилось к измерениям только по наружной поверхности [83]. Это отличие, с одной стороны, снижает разрешающую способность основанных на использовании длинных волн методов, зато с другой, позволяет уменьшить затухание волн и тем самым увеличить базы измерений. На сегодняшний день для оценки состояния плитных и других подобных конструкций (стены, отделки тоннелей, подпорные стены и др.) при доступе только с одной стороны, обычно пользуются следующими способами: импакт-эхо метод (impact-echo testing) и метод поверхностных волн.

1.3.1 Импакт-эхо метод

Импакт-эхо метод на сегодняшний день является популярным неразрушающим методом оценки состояния бетона, предложенным Carino и Sansalone в 1980-х годах [13, 23]. Метод основан на использовании упругих волн, возникающих при ударе, которые проходят через бетон и отражаются от трещин, отслое-

ний, пустот или противоположной стороны поверхности конструкции. С момента появления этот метод оказался очень эффективным при определении места повреждения внутри конструкции, а также для контроля проектной толщины бетонной плиты. На рисунке 1.7 показана схема импакт-эхо метода на примере волновой формы во временной области сигнала и соответствующий частотный спектр при обнаружении дефекта в бетоне [7, 24].

В настоящее время экспериментальные исследования по применению импакт-эхо метода представлены в исследованиях следующих ученых: Д.И. Блохин, А.С. Вознесенский, И.И. Кудинов, В.В. Капустин, А.А. Чуркин, М.П. Ширококов, К. Hashimoto, Т. Shiotani, М. Ohtsu, J.K. Zhang, W. Yan, D.M. Cui, М.Т.А. Chaudhary и др. Метод позволяет эффективно определять толщину бетонных плит фундамента [60], оценивать состояние контакта между ними и основанием, контролировать качества тампонажа заобделочного пространства тоннелей [126], а также обнаруживать повреждения внутри бетонной плиты [6, 35, 44], и оценивать состояние сцепления слоя торкрет-бетона [31].

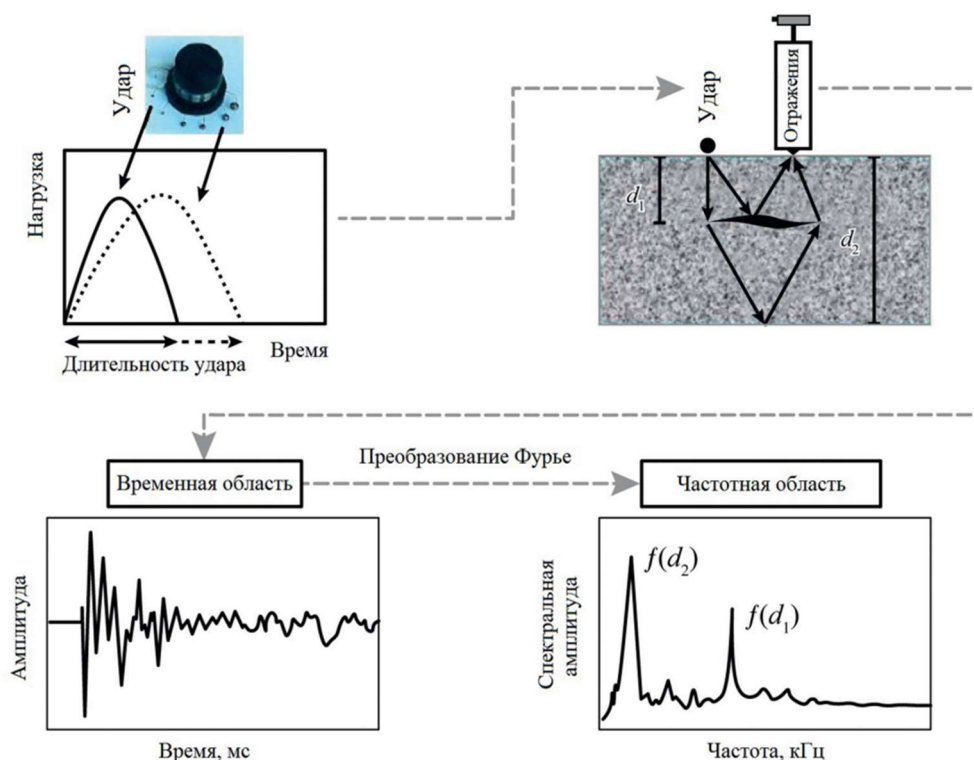


Рисунок 1.7. Схема импакт-эхо метода на примере волновой формы во временной области сигнала и соответствующий частотный спектр при обнаружении дефекта в бетоне [7, 24]

На основе развития импакт-эхо метода широко используется метод анализа отклика путем анализа эхо-сигнала в сочетании с характеристиками временной и частотной областей для получения показателей оценки состояния строительных конструкций. С. Hsiao, С.С. Cheng, Т. Liou предложили метод оценки наличия пустот в бетонном массиве, основанный на разнице частотно-временных диаграмм [14]. S. Lee, Т. Kamada, S. Uchida использовали совокупные спектры изображений множественных ударов и амплитуд на основе импакт-эхо метода, чтобы визуализировать внутреннее состояние конструкции [19]. В работе [20] Н. Qu, М. Li, G. Chen проанализировали бетонные блоки с дефектами и без них, чтобы оценить характеристики дефектов в зависимости от смещения и амплитуды пиковой частоты. В исследованиях А.А. Чуркина и его коллеги [56, 77,] показана применимость атрибута «индекс пустот» для обработки данных метода анализа нормированного акустического отклика и выявления нарушения контактных условий между фундаментной плитой и грунтом (см. рис. 1.8).

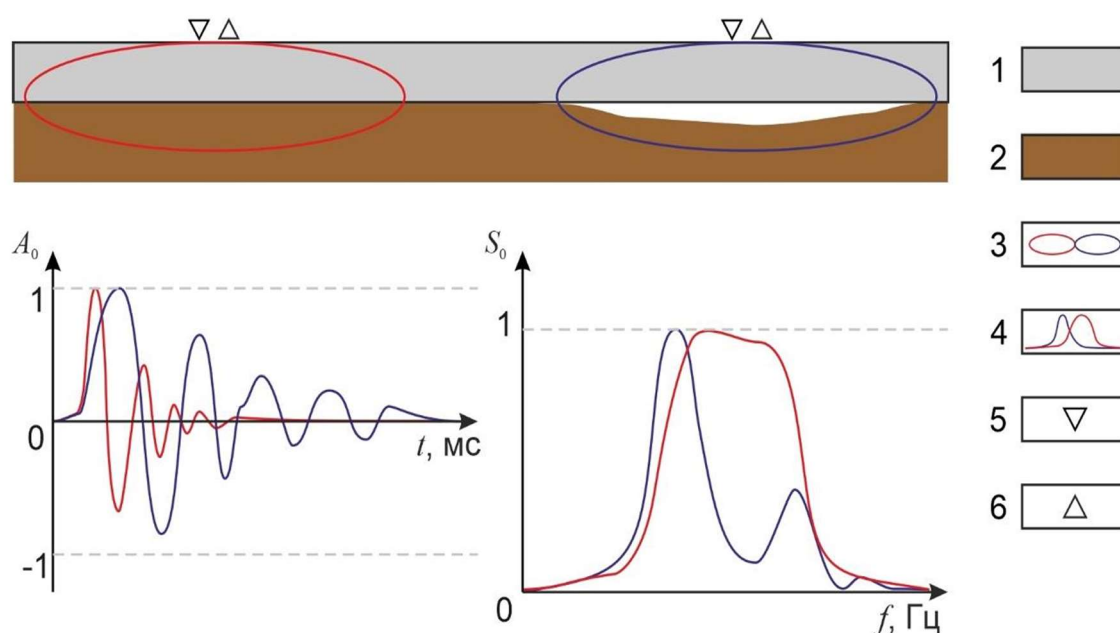


Рисунок 1.8. Принципиальная схема метода анализа нормированного акустического отклика [56].

1 – конструкция, 2 – грунт, 3 – объем среды, вовлеченный в колебание, 4 – идеализированный отклик во временной и частотной области, 5 – источник, 6 – приемник

Таким образом, использование импакт-эхо метода является эффективным и перспективным при решении многих конкретных задач, таких как: оценки характеристик конструкций (толщина, сплошность, качества тампонажа заобделочного пространства тоннелей и т.д.) и оценки качества контакта с грунтовым основанием. Однако использование одного датчика приводит к затрате большого количества времени и к высокой трудоемкости на проведение экспериментов и обработку данных. Более того, применение импакт-эхо метода также имеет ограничения при оценке механических свойств материалов по толщине конструкции.

1.3.2 Метод поверхностных волн

В настоящее время методы, основанные на анализе параметров поверхностных волн, большее распространение получили в геофизических исследованиях [5, 15, 39], так как эти волны отличаются слабым затуханием и могут распространяться на большие расстояния. Применение поверхностных волн (или волн Релея) для обследования приповерхностных слоев конструкций может быть весьма эффективно благодаря ряду замечательных свойств этих волн [96, 100]:

- Фундаментальной предпосылкой, на которую опираются сейсмологи при использовании поверхностных волн для изучения характеристик среды, является тот факт, что эти волны двигаются вдоль поверхности. Следовательно, измерение поверхностных волн должно быть относительно простым
- По сравнению с другими типами волн, эти волны имеют меньшую скорость затухания.

- Большая часть энергии, генерируемой во время удара, передается в виде поверхностных волн, а остальная часть – в виде объемных волн.

Первые исследования, касающиеся использования поверхностных волн для изучения многослойных строительных конструкций, в частности твердых дорожных покрытий, появились в Европе в 1940-х и 1950-х годах.

Позже были разработаны методы экспериментального определения дисперсионных кривых поверхностных волн, аппаратура для их реализации и методы интерпретации полученных результатов. Однако методы экспериментального определения дисперсионных кривых основывались на возбуждении гармонических волн с помощью вибраторов, что делало процесс измерений громоздким и трудоемким. Поэтому эти методы не вышли за рамки научных экспериментов.

Новый импульс развитию методов обследования строительных конструкций с использованием поверхностных волн был дан с созданием в 1983 г. в США метода спектрального анализа поверхностных волн – САПВ (SASW) [25]. Суть метода заключается в возбуждении широкополосного спектра поверхностных волн, например, импульсным воздействием, измерении вибраций в двух точках, расположенных на одной линии с источником и их спектральном анализе. По полученным спектрам (сдвигу фаз в них) строится дисперсионная кривая (зависимость скорости поверхностной волны от ее длины).

Подобно методика описывается в [25, 40]. По этому подходу используются пары приемников (низкочастотных геофонов), которые расставляются в нескольких точках с разным шагом (см. рисунок 1.9). В таких случаях возникает необходимость в проведении значительного количества измерений на одной участке. Эта особенность метода приводит к значительному увеличению времени и трудоемкости.

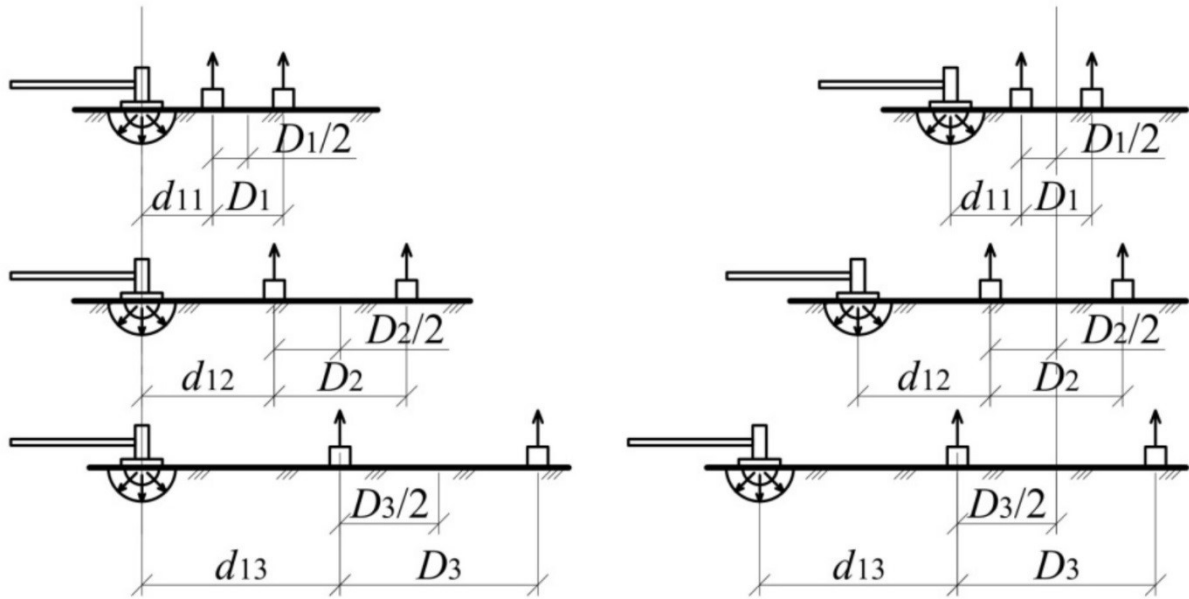


Рисунок 1.9. Схема проведения испытания методом спектрального анализа поверхностных волн [40]

Поверхностные волны для обследования строительных конструкций в настоящее время используются для обнаружения крупных локальных дефектов. Использование в этом методе для построения дисперсионных кривых спектрально - аналитических алгоритмов позволило достигнуть высокого уровня автоматизации процесса обработки результатов измерения. Однако в случае, если вблизи области измерения находятся отражающие границы (аномалии, границы конструкции и т.д.), то отраженные от этих границ волны могут вносить значительные погрешности в форму дисперсионной кривой.

Метод анализа многоканальных поверхностных волн (англ. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)) - МАПВ является развитием метода спектрального анализа поверхностных волн. [86, 102, 104]. МАПВ основан на регистрации поверхностных волн от различных источников и последующем анализе полученных сейсмограмм для создания волнового профиля. В отличие от САПВ в МАПВ используется большое число каналов, что избавляет от необходимости многократного переставления пары приемников. Основными преимуществами MASW по сравнению с методом SASW являются более эффективная процедура сбора данных в полевых условиях, более быстрая и менее трудоемкая процедура

обработки данных, а также улучшенная идентификация и устранение шумов из записанных данных. Методика полевых работ и анализа полевых данных подробно изложена в статьях [40, 86].

В настоящее время распространение сейсмических и акустических волн в конструкциях с отражающими границами рассмотрели Jacopo Marazzani, Nicola Cavalagli, Vittorio Gusella [58], Young Hak Lee, Taekeun Oh [49], Nils Ryden, Choon B. Park, Peter Ulriksen, и Richard D. Miller [112]. Исследование по использованию волн Лэмба для оценки глубины трещин на поверхности бетона представлены в работе Seong-Hoon Kee и Boohyun Nam [110], Sung Woo Shin, Jinying Zhu, Jiyoung Min, и John S. Popovics [111]. Для определения зоны расслоения массива бетонной плиты проведены эксперименты измерения поверхностных волн, которые показаны в статьях Seong-Hoon Kee, Jin-Wook Lee, Ma. Doreen Candelaria [109], Л. Д. Распорская, Д. А. Савин, И. В. Ситников [113]. В России большой объем исследований, посвященных обследованию строительных конструкций с использованием сейсмоакустических волн, был проведен С.Н. Савиным, И.В. Ситниковым, и их коллегами из 23 Государственного морского проектного института [43, 48, 75, 80, 97].

Метод пока находится в стадии развития и является сложным как по методу измерения, а также и по способу обработки данных и последующей их интерпретации. На сегодняшний день применения этого метода для обследования бетона и каменной кладки все еще очень ограничены и сталкиваются со многими трудностями. Большинство исследователей сосредоточены в основном на решении задач определения прочности и обнаружения локальных дефектов и повреждений путем экстраполяции в область коротких длин волн на основе анализа результатов значения скорости поверхностной волны [117, 120]. При этом метод применяется для бетонных материалов в качестве ультразвукового неразрушающего контроля [93, 94, 98]. Поэтому результаты также отражают характеристики поверхностных слоев конструкций. Кроме того, хотя использование коротковолнового диапазона обеспечивает более точные результаты, оно также снижает базу измерения. Поэтому необходимо использовать большое количество датчиков акселерометра и

уменьшить расстояние шагов установки между ними [49] (см. рисунок 1.10). Таким образом, необходимо выполнять множество измерений и это затратно по трудоёмкости и времени.

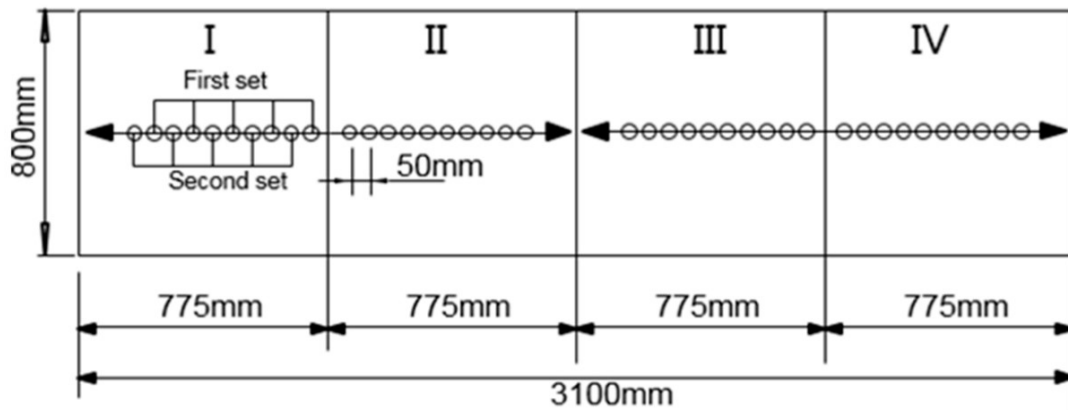


Рисунок 1.10. Варианты установки датчиков в работе [49]

Для получения большего объема данных о свойствах строительных материалов конструкции необходимо использовать широкие диапазоны частот акустических волн. При этом экспериментальные исследования иногда дают неожиданные результаты со «странными» дисперсионными кривыми. Поэтому для их анализа и однозначного понимания все еще возникает множество проблем и необходимо учитывать различные факторы, такие как: правильная оценка влияния упругих параметров материала, выбор подходящего диапазона длин волн и различных вариантов повреждений и дефектов. Отсюда следует, что данный метод может быть применен для решения многих конкретных задач.

1.4. Выводы главы

- В настоящее время существует много проблем при обследовании зданий и сооружений. Основные неразрушающие методы в действующих нормативных документах, но при этом обладают и рядом недостатков. Самым большим минусом

у этих методов является ограничение измерительной базы, низкая эффективность обработки результатов, точечный характер диагностических оценок, незавершенность методических подходов к оценке полученных результатов, а для каменной кладки – отсутствие нормативной базы для внедрения прогрессивных методов оценки ее параметров.

- Для обследования кирпичных кладок неразрушающим методом большинство ученых считали, что наиболее достоверные данные о характеристиках кладки дает метод с использованием плоского прессы (Flat – Jack – Test). Тем не менее, существенные препятствия, ограничивающие его использование, заключаются в том, что метод значительно нарушает целостность испытанного участка кладки, а также в относительно высоких расходах на оборудование и работы.

- Существует метод с использованием акустических и сейсмических волн для проведения испытания при одностороннем доступе к конструкции, который в настоящее время применяются для обнаружения пустот, трещины, зоны отслоения в бетонной плите и оценки качества контакта с грунтовым основанием. Но для оценки механических характеристик строительных материалов он пока находится в стадии развития и является сложным как по организации измерения, так и по способу обработки данных и последующей их интерпретации. При этом необходимо учитывать различные факторы, такие как: правильная оценка влияния упругих параметров материала, выбор подходящего диапазона длин волн и различных вариантов повреждений и дефектов. Отсюда следует, что совершенствование и развитие данного метода является перспективным направлением исследований и главной целью представленной диссертации.

II. ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЗНАЧИМЫХ ФАКТОРОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗГИБНЫХ ВОЛН В ПЛОСКОСТНЫХ КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ.

В данной главе представлены результаты теоретических, аналитических и экспериментальных исследований по оценке влияния значимых факторов на распространение изгибных волн в плоскостных каменных конструкциях. По результатам исследований разработаны теоретические модели для оценки механических характеристик строительных материалов, а также необходимые данные для разработки методов проведения испытаний и обработки результатов.

2.1 Анализ распространения изгибных волн в однородной плите

Для дальнейшего исследования характера распространения в плоскостных каменных конструкциях разночастотных волн следует привлечь теоретические выводы Лэмба [2-3], который показал, что при возбуждении в сплошной однородной бесконечной плите непрерывных синусоидальных колебаний в ней распространяется два типа волн. Как известно: первый тип – симметричный; второй тип – антисимметричный, см. рис. 2.1. В симметричных волнах колебание материальных точек симметрично по отношению к средней плоскости плиты, т.е. в верхней и нижней половинах пластины смещение X_u имеет одинаковые знаки, а смещение U_z – противоположные. В антисимметричных волнах вид колебания деформирует плиту подобно изгибающей нагрузке, поэтому эти волны называются изгибными. В этом случае смещение U_s имеет противоположные знаки, а смещение U_z – одинаковые.

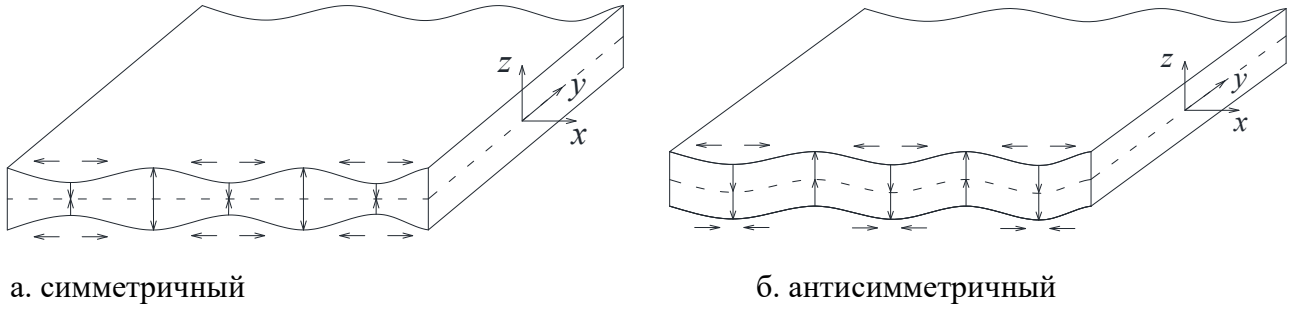


Рисунок 2.1. Волны Лэмба

Согласно [30, 85] уравнения распространения упругих волн через скалярный φ и векторный потенциал ψ в однородной плите имеет вид:

$$\Delta\varphi + k_l^2\varphi = 0; \Delta\psi + k_t^2\psi = 0 \quad (2.1)$$

Где: $k_l = \omega\sqrt{\rho/(\lambda + 2\nu)}$, $k_t = \omega\sqrt{\rho/\nu}$ - волновые числа соответственно продольных и поперечных волн; ρ - плотность среды; λ , ν - упругие константы Ламе.

Следуя Лэмбу, общее решение системы уравнений (2.1) может быть представлено в таком виде:

$$\varphi = A \exp(-qz + i(kx - \omega t)); \psi = B \exp(-sz + i(kx - \omega t)) \quad (2.2)$$

Где: $q = k^2 - k_l^2$, $s = k^2 - k_t^2$; k - волновое число волн Лэмба; A , B - постоянные.

Анализируя выражения (2.2) с учетом следующих граничных условий:

- Смещение частицы только по осям X, Z;
- Напряжения на граничных поверхностях $z = \pm H/2$ равны нулю;

Тогда дисперсионную кривую для основных колебаний антисимметричных волн определяют из характеристического уравнения [45, 46, 50], полученного Лэмбом в таком виде:

$$\frac{\text{th}\beta_1 H/2}{\text{th}\beta_2 H/2} = \frac{4\beta_1\beta_2}{\eta^2\xi^2}, \quad (2.3)$$

в котором $\xi = 2\pi/\lambda$ — номер моды колебания; $\beta_1 = \xi\sqrt{1 - \frac{V_u^2}{V_p^2}}$; $\beta_2 = \xi\sqrt{1 - \frac{V_u^2}{V_s^2}}$; $\eta = 2 - \frac{V_u^2}{V_s^2}$; V_u - фазовая скорость; V_p - скорость продольной волны; V_s - скорость поперечной волны.

В бесконечном материальном пространстве могут распространяться два различных типа волн: волны сжатия и волны сдвига. Каждый тип волн характеризуется скоростью, характерной для конкретного материала. Сжимающая волна определяется движением частиц в направлении распространения волны и всегда имеет наибольшую скорость. Поэтому ее также называют первичной волной или Р-волной. Сдвиговая волна имеет движение частиц поперек направления распространения волны. Она имеет меньшую скорость по сравнению с первичной волной и также называется вторичной волной или S-волной. Первичные и вторичные волны вместе называются объемными волнами. Распространение Р- и S-волн показано на рисунке 2.2 [115].

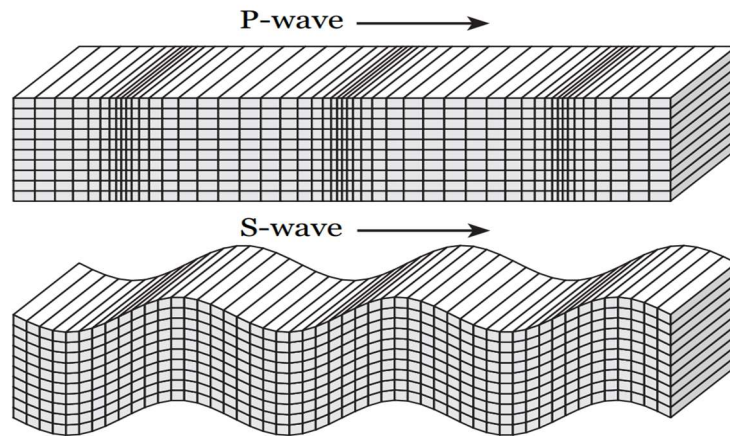


Рисунок 2.2. Распространение Р- и S-волн [115]

Используя соотношения между упругими константами Ламе, модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона μ , получены выражения основных скоростей распространения упругих волн. Скорости распространения продольной и поперечной волн зависят от упругих свойств, и они выражаются через модуль Юнга E согласно уравнениям 2.4 и 2.5 соответственно [116],

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2.4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \quad (2.5)$$

В настоящее время широко применяется метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW), который позволяет определять скорости распространения рэлеевской волны. Волна Релея представляется на рисунке 2.3 и образуется вблизи свободной поверхности. Движение частиц в ней имеет эллиптическую форму, перпендикулярно поверхности и содержит смещение в направление распространения. Для определения скорости распространения волны Релея используется следующее уравнение [114, 119]:

$$V_R^6 - 8V_s^2V_R^4 + (24 - 16\frac{V_s^2}{V_p^2})V_s^2V_R^2 + 16(\frac{V_s^2}{V_p^2} - 1)V_s^6 = 0 \quad (2.6)$$

где V_R — скорость рэлеевской волны;

Решение уравнения (2.6) приводит к значениям скорости Рэлеевской волны. Следовательно, это значение выражено по формуле:

$$V_R = \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{\rho(1 + \mu)}} \quad (2.7)$$

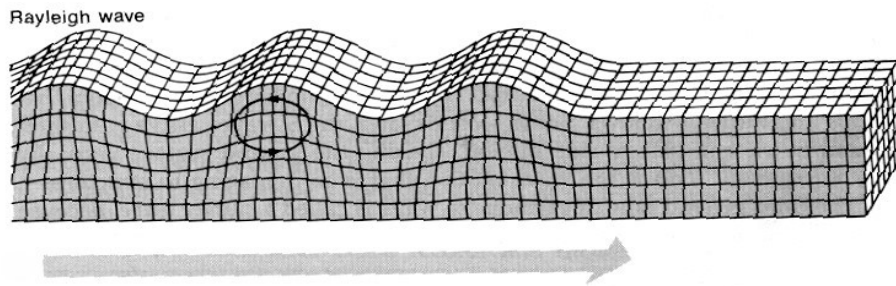


Рисунок 2.3. Распространение волны Релея [118]

Итак, основными типами волн, встречающимися в строительных конструкциях, являются объемные (продольные и поперечные), а также канальные (стержневые, пластинчатые и поверхностные) [125]. Их скорость связана с коэффициентом Пуассона, что позволяет легко определять упругие характеристики строительных материалов. Теория упругости дает следующие соотношения между скоростями этих волн (рис. 2.4) [126-128]:

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)}}; \quad (2.8)$$

$$\frac{V_R}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} \cdot \frac{0,87+1,12\mu}{1+\mu}; \quad (2.9)$$

$$\frac{V_R}{V_s} = \frac{0,87+1,12\mu}{1+\mu}; \quad (2.10)$$

$$\frac{V_d}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{1-\mu}} (1+\mu); \quad (2.11)$$

$$\frac{V_{nl}}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{(1-\mu)^2}}; \quad (2.12)$$

где V_d — скорость стержневой волны; V_{nl} — скорость пластинчатой волны.

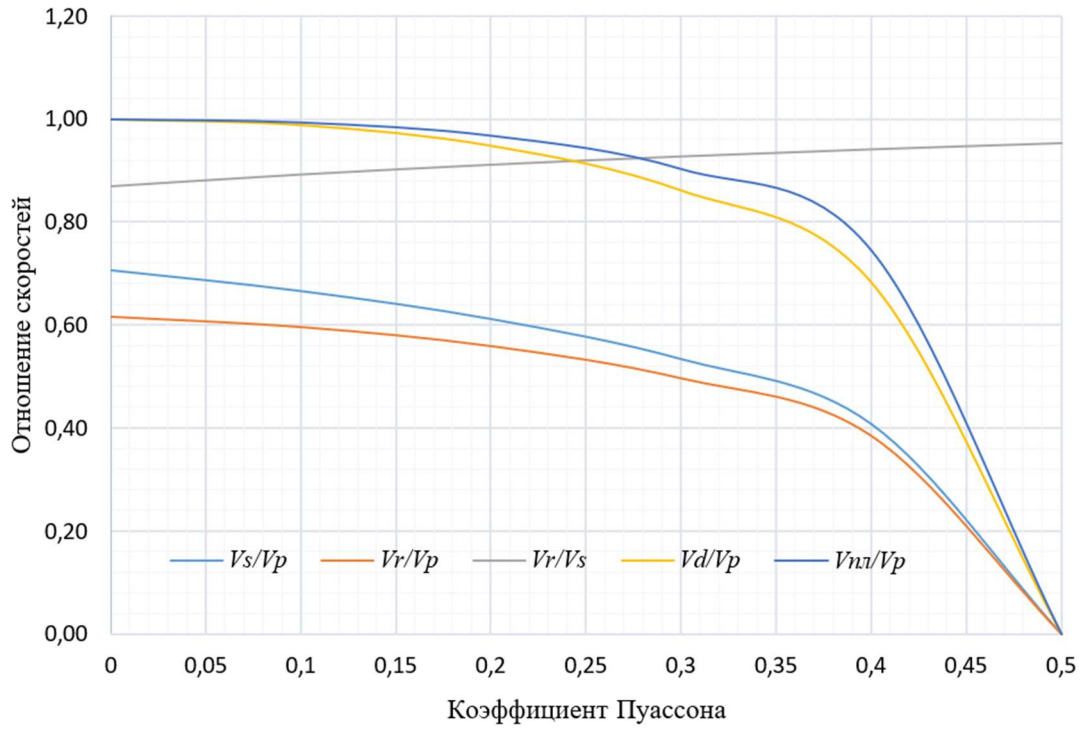


Рисунок 2.4. Теоретические зависимости отношения скоростей различных волн от коэффициента Пуассона

Из уравнений (2.3, 2.4, 2.9, 2.10) следует, что зависимость между безразмерными параметрами $\frac{V_H}{V_R}$ и $\frac{\lambda}{H}$ может быть выражено как:

$$(3) \Leftrightarrow \frac{th\left(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{V_u^2}{V_p^2}}\right)}{th\left(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{V_u^2}{V_s^2}}\right)} = \frac{4 \sqrt{\left(1 - \frac{V_u^2}{V_p^2}\right) \left(1 - \frac{V_u^2}{V_s^2}\right)}}{\left(2 - \frac{V_u^2}{V_s^2}\right)^2} \quad (2.13)$$

$$\frac{th(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{V_u^2(1-2\mu)(0,87+1,12\mu)^2}{2V_R^2(1-\mu)(1+\mu)^2}})}{th(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{V_u^2(0,87+1,12\mu)^2}{V_R^2(1+\mu)^2}})} = \frac{4\sqrt{(1 - \frac{V_u^2(1-2\mu)(0,87+1,12\mu)^2}{2V_R^2(1-\mu)(1+\mu)^2})(1 - \frac{V_u^2(0,87+1,12\mu)^2}{V_R^2(1+\mu)^2})}}{(2 - \frac{V_u^2(0,87+1,12\mu)^2}{V_R^2(1+\mu)^2})^2} \quad (2.14)$$

По уравнению (2.14) можно доказать, что при $f = 0$ $V_w/V_R \rightarrow 0$, а при $f = \infty$ $V_w/V_R \rightarrow 1$, и тогда $V_w = V_R$. В этом случае при $f = \infty$ можно оценить характеристик материалов с помощью метода MASW. Для различных диапазонов частот дисперсионное уравнение (2.3) является трансцендентным уравнением, и решить его не просто. Из теоретических формул упругости после преобразования уравнения (2.14) получаем функцию $F(\alpha)$:

$$F(\alpha) = (p-1)\alpha^{g+h} - (p+1)\alpha^g + (p+1)\alpha^h - (p-1) = 0 \quad (2.15)$$

$$\text{Где: } \alpha = e^{2\pi H/\lambda_B}; \quad p = \frac{4gh}{(1+h^2)^2}; \quad g = \sqrt{1 - \frac{V_u^2}{2V_R^2} \frac{(1-2\mu)(0,87+1,12\mu)^2}{(1-\mu)(1+\mu)^2}}; \quad h = \sqrt{1 - \frac{V_u^2}{V_R^2} \frac{(0,87+1,12\mu)^2}{(1+\mu)^2}};$$

λ_B - Длина волны; V_R - скорость Рэлееской волны; μ - коэффициент Пуассона.

Очевидно, что колебания изгибных волн распространяются со скоростью, которая зависит от частоты колебания, а также от толщины и упругих свойств конструкций. Конечное решение из уравнения (2.15) представляет собой теоретическую зависимость между скоростью изгибной волны и ее длиной, которую можно использовать для построения дисперсионных кривых либо годографов. Эти исходные данные могут быть положены в основу создания теоретических моделей для контроля качества материалов плитных и стеновых конструкций, обнаружения дефектов и повреждений при решении обратных задач на реальных объектах.

2.2 Особенности распространения упругих волн в каменной кладке

Кирпичные кладки могут быть представлены в виде чередующихся слоев материалов кирпича и раствора толщиной h_1 и h_2 , обладающих различными плотностями ρ_1, ρ_2 , модулями деформации и разными коэффициентами Пуассона (E_1, E_2, μ_1, μ_2). Особенности распространения упругих волн в слоистых средах подобно рассмотрены в работах Рытов С.М., Бреховских Л. М. [9, 12]. Сравнительно простым является уравнение для распространения колебаний продольных волн перпендикулярно слоям [18]:

$$\cos \frac{2\pi f}{V_f} (h_1 + h_2) - \cos 2\pi\beta \cos 2\pi\beta qm + D \sin 2\pi\beta \sin 2\pi\beta qm = 0 \quad (2.16)$$

Где V_f – фазовая скорость продольных колебаний с частотой f ; $\beta = \frac{h_1}{\lambda} = \frac{h_1 f}{V_1}$; $q = V_1 / V_2$; $m = h_2 / h_1$; $D = \frac{V_1^2 \rho_1^2 + V_2^2 \rho_2^2}{2V_1 \rho_1 V_2 \rho_2}$

Где V_1, V_2 – скорости продольных волн в слоях мощностью h_1 и h_2 , плотностью ρ_1 и ρ_2 .

Общее решение уравнения можно представить в виде:

$$V_f = \frac{2\pi f h_1 (1 + m)}{\arccos(\cos 2\pi\beta \cos 2\pi\beta qm - D \sin 2\pi\beta \sin 2\pi\beta qm)} \quad (2.17)$$

Из (2.17) следует, что V_f – функция параметра β . При $\beta \rightarrow 0$, т.е. $\lambda \gg h_1$, $V_f \rightarrow V_o$, где $V_o = \frac{V_1(1+m)}{\sqrt{1+q^2 m^2 + 2Dqm}}$

Если $\beta \rightarrow \infty$, т.е. $\lambda \ll h_1$, $V_f \rightarrow V_\infty$, то $V_\infty = \frac{V_1(1+m)}{1+qm}$

Для оценки различия фазовых скоростей V_∞ и V_o рассмотрим отношение:

$$\frac{V_\infty}{V_o} = \sqrt{1 + \frac{2qm(D-1)}{(1+qm)^2}} \quad (2.18)$$

Очевидно, что любое изменение значений параметра D может существенно повлиять на результаты расчета по оценке скоростей распространения волны. Для

оценки реально возможных значений параметра D кладок строят графики его изменения в зависимости от соотношения V_1/V_2 и ρ_1/ρ_2 в камне и растворе (рис. 2.5).

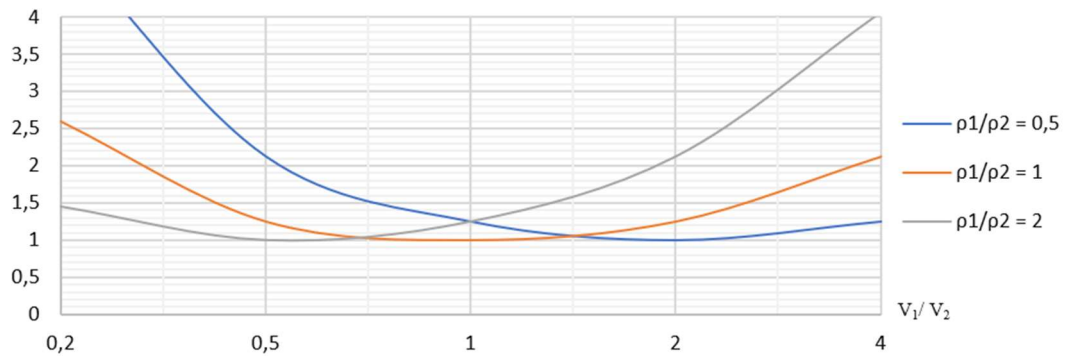


Рисунок 2.5. Зависимость значений параметра D от соотношения V_1/V_2 и ρ_1/ρ_2

Принимаем $\rho_1/\rho_2 = 1$ то зависимость V_∞/V_o от V_1/V_2 для различных h_2/h_1 представлена на рисунке 2.6:

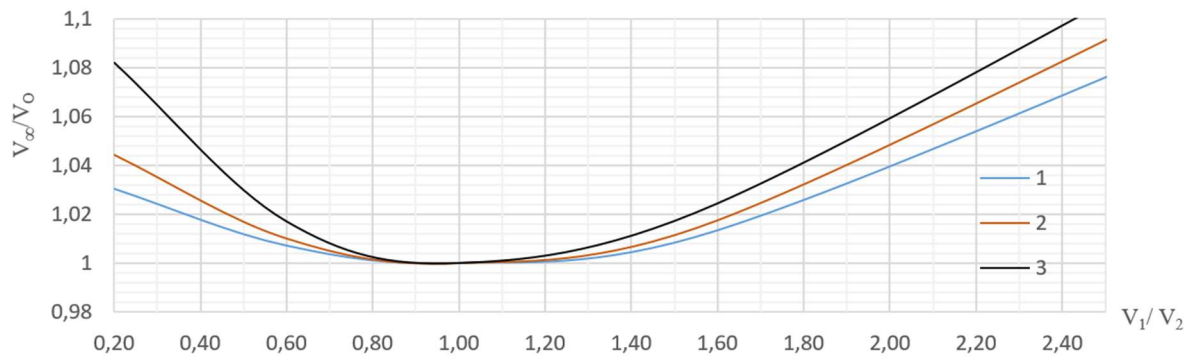


Рисунок 2.6. Зависимость V_∞/V_o от V_1/V_2 для различных h_2/h_1 при $\rho_1/\rho_2 = 1$
(1 - $h_2/h_1=0,1$; 2 - $h_2/h_1=0,2$; 3 - $h_2/h_1=0,3$)

На рисунке видно, что чем ближе отношение V_∞/V_o к единице, тем более однородной является конструкция. При рассмотрении отношения V_f/V_o заметим, что в целом оно с уменьшением β понижается. Для кирпичных кладок при использовании волн с длиной $\lambda \gg h = h_1 + h_2$ такая мелкослоистая среда, как кладка, может рассматриваться как однородная.

2.3 Влияния параметров плоскостных каменных конструкций на скорости распространения изгибных волн

Для изучения акустических свойств и механических характеристик строительных материалов необходимо сначала решить трансцендентное уравнение (2.15) для нахождения зависимости между коэффициентом Пуассона, скоростью распространения изгибных волн, длиной волны и толщиной конструкции. Здесь, при известном значении коэффициента Пуассона, и отношении скоростей V_w/V_R уравнение (2.15) возможно решить методом деления отрезка (метод последовательных приближений) пополам на программной платформе Matlab, чтобы найти соответствующее пропорциональное значение H/λ . Алгоритм метода решения в программе Matlab представлен на рисунке 2.7.

Если допустимая ошибка равна ε , то условие, что количество итераций n должно удовлетворять следующему условию:

$$\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2^n} \leq \varepsilon \quad (2.19)$$

Где: α_1, α_2 – координаты левой и правой точек в интервале, где ожидается появления решения уравнения.

Отсюда количество итераций определяется по формуле:

$$n \geq \frac{\ln(\alpha_2 - \alpha_1) - \ln \varepsilon}{\ln 2} \quad (2.20)$$

Наконец, по результатам решения уравнения искомое значение H/λ определяется по следующей формуле:

$$\frac{H}{\lambda} = \frac{\ln \alpha}{2\pi} \quad (2.21)$$

Проведение наблюдений на скорости распространения изгибных волн имеет свои особенности, обусловленные как физическими условиями, так и спецификой решаемых задач. Физические условия сводятся к тому, что наблюдения выполняются на слоях плиты, имеющих разные механические свойства по толщине или

ограниченные размеры. Из уравнения (2.15) видно, что волна распространяется со скоростью, которая зависит от ее длины, а также от толщины и упругих свойств плиты.

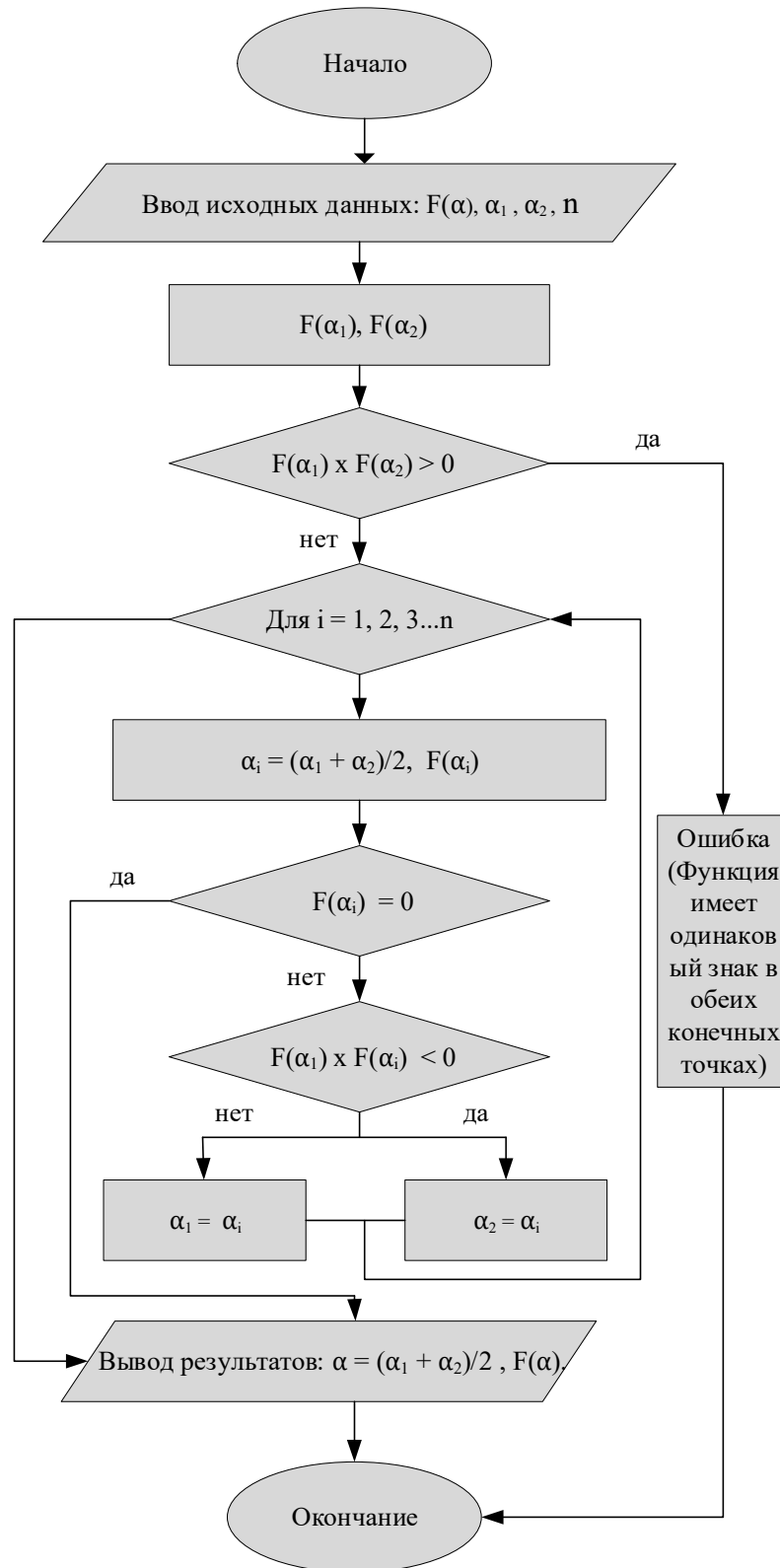


Рисунок 2.7. Блок – схема для решения уравнения (2.15) в программе Matlab

Для различных значений коэффициента Пуассона при решении уравнения (2.15) получено множество значений λ/H и соответствующих значений V_w/V_R , которые приведены в таблице 2.1 и на рис. 2.8.

Таблица 2.1 - Точки координат дисперсионных кривых при различных коэффициентах Пуассона

V_w/V_R	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\mu=0,1$	0,033	0,068	0,105	0,148	0,198	0,260	0,346	0,475	0,719
$\mu=0,15$	0,033	0,067	0,103	0,145	0,194	0,256	0,341	0,469	0,714
$\mu=0,2$	0,032	0,065	0,101	0,142	0,190	0,251	0,333	0,459	0,704
H/λ $\mu=0,25$	0,031	0,064	0,099	0,139	0,186	0,245	0,326	0,448	0,691
$\mu=0,3$	0,030	0,062	0,096	0,135	0,181	0,239	0,317	0,438	0,676
$\mu=0,35$	0,029	0,060	0,093	0,131	0,176	0,231	0,308	0,425	0,658
$\mu=0,4$	0,028	0,058	0,090	0,127	0,169	0,223	0,297	0,410	0,637

a)

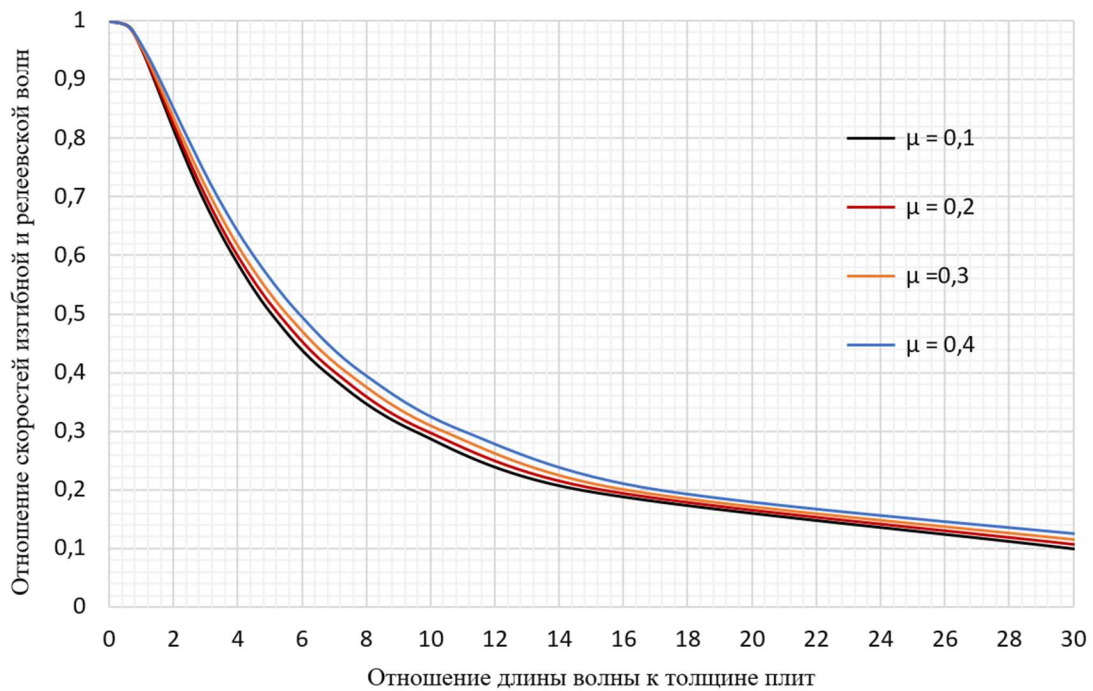


Рисунок 2.8. Графики дисперсионных кривых при различных значениях коэффициента Пуассона: a — участок λ/H от 0 до 30;

б)

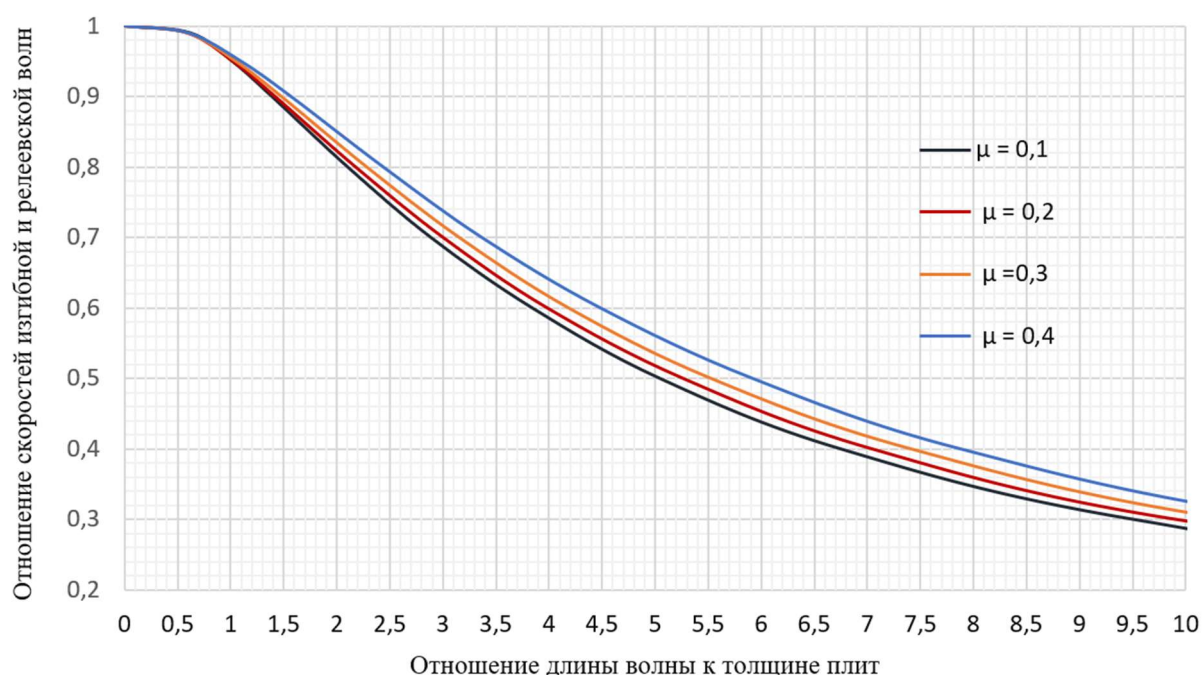


Рисунок 2.8. Графики дисперсионных кривых при различных значениях коэффициента Пуассона: $\bar{b}$ — участок λ/H от 0 до 10

В любом случае предполагается, что динамический коэффициент Пуассона плиты и стены известен. По таблице 2.1 ошибки в определении скорости продольной волны составляют, если μ меняется от 0,2 до 0,3, менее $\pm 2,3\%$.

Изучение реакций конструкции в разных частотных диапазонах дает нам лучший результат для оценки характеристик строительных материалов конструкций при обследовании здания и сооружений. Результаты решения прямых задач реакций конструкции для бетона различных прочностей показан на рисунке 2.9:

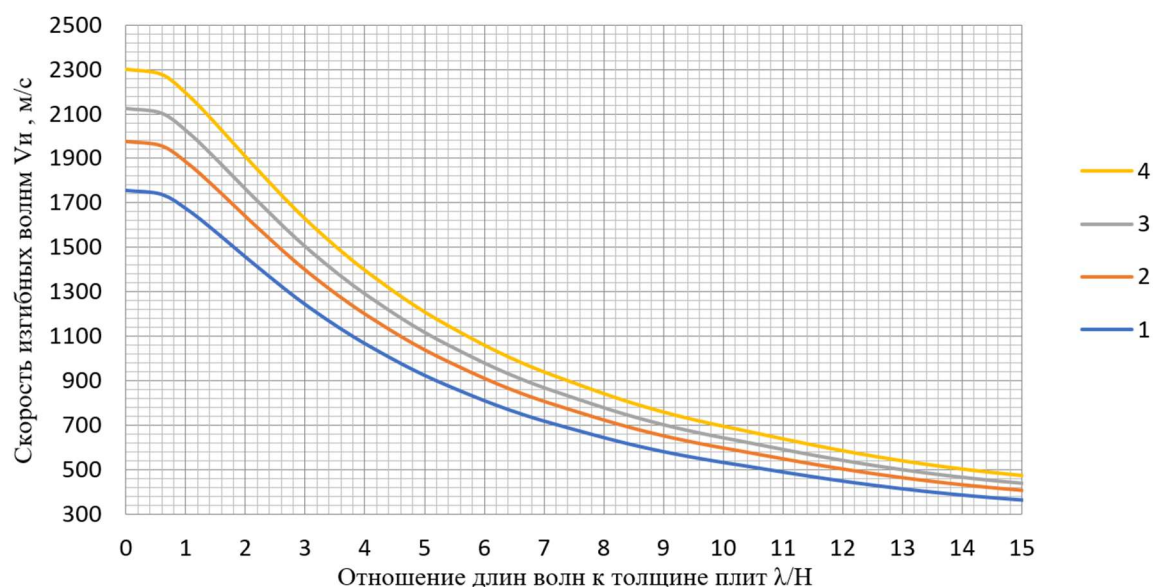


Рисунок 2.9. Дисперсионные кривые для бетона с различным динамическим модулем упругости (1 - $E_d = 22000$ МПа, 2 - $E_d = 27500$ МПа, 3 - $E_d = 32000$ МПа, 4 - $E_d = 37500$ МПа)

По уравнению (2.15) также можно решить обратную задачу для определения толщин конструкций плитного типа и стеновых конструкций. Результаты теоретических дисперсионных кривых при различных толщинах плит показаны на рисунке 2.10.

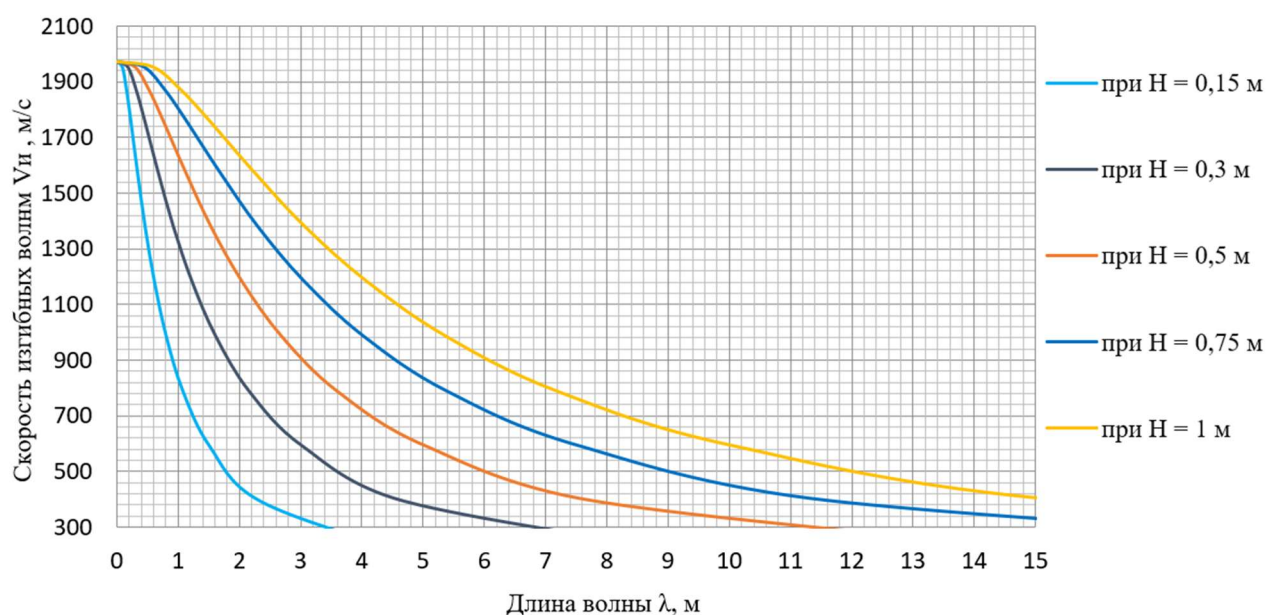


Рисунок 2.10. Дисперсионные кривые при различных толщинах плит ($E_d = 27500$ МПа)

Джонсом было доказано [18, 26], что для реальных сред при распространении изгибных волн должно выполняться условие $0,4 < V_w/V_R < 0,7$. Следует подчеркнуть, что в этом диапазоне значений кривая на графике представляет собой отрезок прямой линии. При этом мы можем написать уравнение прямой с использованием таблицы 2.1 и рис. 2.8 в случае $\mu = 0,25$ [29, 34]:

$$\frac{V_R}{V_w} = 0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H} \quad (2.22)$$

А среднее значение скорости рэлеевской волны определяется по формуле [52]:

$$\bar{V}_R = \frac{b-a}{k} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k V_w^i}{\int_a^b \frac{1}{0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H}} d\left(\frac{\lambda}{H}\right)} \quad (2.23)$$

Где: k - количество отсчетов фазовых скоростей в диапазоне частоты при выполнении условия $0,4 < V_w/V_R < 0,7$; a, b - значения отношения λ/H , соответственно, при $V_w/V_R = 0,7$ и $0,4$

В случае рассмотрения $0,2 < V_w/V_R < 0,8$ по формулам (7) и (8) также можно использовать для определения скорости рэлеевской волны с погрешностью менее 2-3%.

2.4 Влияние длин изгибных волн на результаты обследования плоскостных каменных конструкций

Из уравнения (2.15) следует, что скорость распространения изгибных волн распространяются со скоростью, которая сильно зависит от их частоты. Выше показано, что, когда длина волны стремится к нулю, тогда ее скорость (изгибных

волн) $V_{\text{и}}$ равна скорости Рэлеевской волны $V_{\text{Р}}$. При этом сильно влияет на фазовые скорости в основном только свойство материалов на поверхности конструкций. Для таких случаев мы сможем определить свойство материалов на поверхности конструкций, но совершенно неспособны обнаружить дефекты и повреждения в внутри сечения. Кроме того, невозможно отличить дефект, повреждение в верхней части сечения от дефекта и повреждения «на всем сечении». А когда длина волны стремится к бесконечности, тогда скорость поверхностных волн $V_{\text{и}}$ приближается к нулю. Тогда вообще невозможно решить задачи определения характеристик строительных материалов плитных и стеновых конструкций при использовании таких низких частот.

Рассмотрим пример, когда необходимо решить задачу контроля строительных материалов с использованием изгибных волн в однородной плите из бетона толщиной 1 метр со скоростью продольной волны в ненарушенном бетоне $V_{\text{р}} = 4000$ м/с, примем, что имеющийся дефект снижает скорости продольной волны до 3000 м/с (соответственно динамический модуль упругости $E = 19000$ МПа) на участке от 0 до 1.5 метров, см. рис. 2.11:

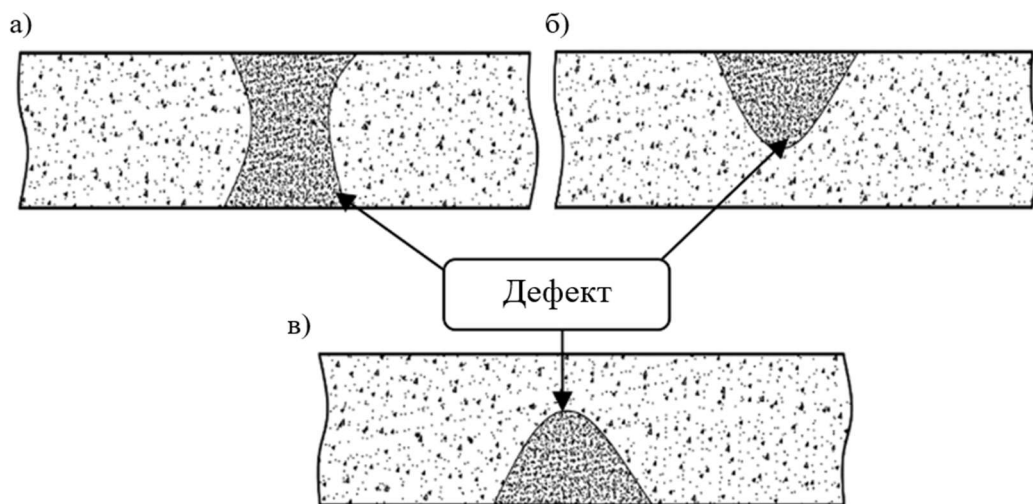


Рисунок 2.11. Плиты с дефектами

а) 1-й случай – дефект через всю толщину, б) 2-й случай – дефект в верхней части сечения в слое толщиной 0,5 м, 3-й случай – дефект в нижней части сечения в слое толщиной 0,5 м

Для определения оптимальных частот, позволяющих выявлять дефекты в верхней части сечения и дефекты на всю толщину сечения или обнаружить дефект в нижней части сечения плиты, требуется рассматривать наш пример, как конструкцию двухслойной плиты с дефектным участком. Тогда, согласно аддитивному правилу или правилу смещения, упругие константы и плотность определяются по следующим формулам [59, 79]:

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{H} \left(\frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2} \right) \quad (2.24)$$

$$\mu = \frac{1}{H} (\mu_1 h_1 + \mu_2 h_2) \quad (2.25)$$

$$\rho = \frac{1}{H} (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) \quad (2.26)$$

Подставляя известные значения модулей упругости, толщину и коэффициент Пуассона в уравнение (2.15) получаем результат, при котором множество решений скоростей изгибных волн $V_{и}^1$, $V_{и}^2$, $V_{и}^3$ в зоне имеющих дефектов соответствует значениям длин волн $\lambda_{в}$, см. таблицу 2.2.

Таблица 2.2 - Результаты скоростей изгибных волн в различных случаях

$V_{и}/V_R$	1	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1	0
$\lambda_{в}$	≈ 0	1,45	3,06	5,50	10,1	32	∞
$V_{и}^1$	1485	1336	1040	742	445	148	0
$V_{и}^2$	1485	1522	1184	846	508	169	0
$V_{и}^3$	1980						
$\Delta V_{и}$	0	186	144	104	63	21	0
	495						

При разделении на поддиапазоны по частотам и вычислении средней скорости распространения волны для каждой точки измерительного створа внутри каждого частотного поддиапазона приведены примеры годографов (см. рис. 2.12-2.15) изменения скоростей изгибных волн для однородной плиты толщиной 1 м со ско-

ростью продольной волны $V_p = 4000$ м/с, имеющий дефект со снижением скорости продольной волны до 3000 м/с на участке от 0 до 1.5 метров.

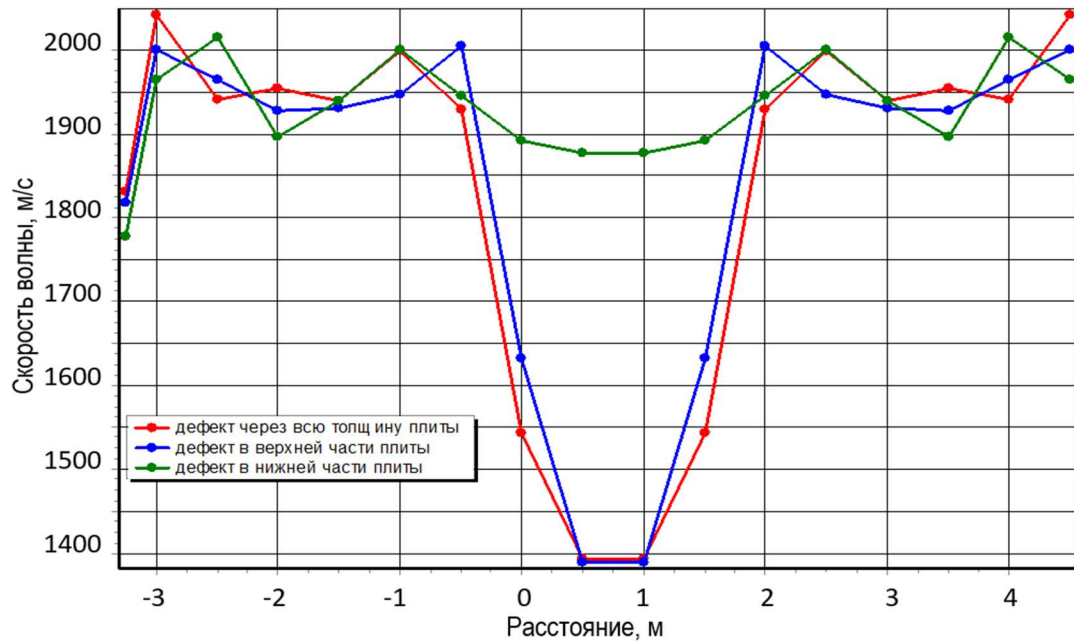


Рисунок 2.12. Годографы изменения скоростей изгибных волн в плите в диапазоне частот 2000 – 5000 Гц (длины волн до 1 м)

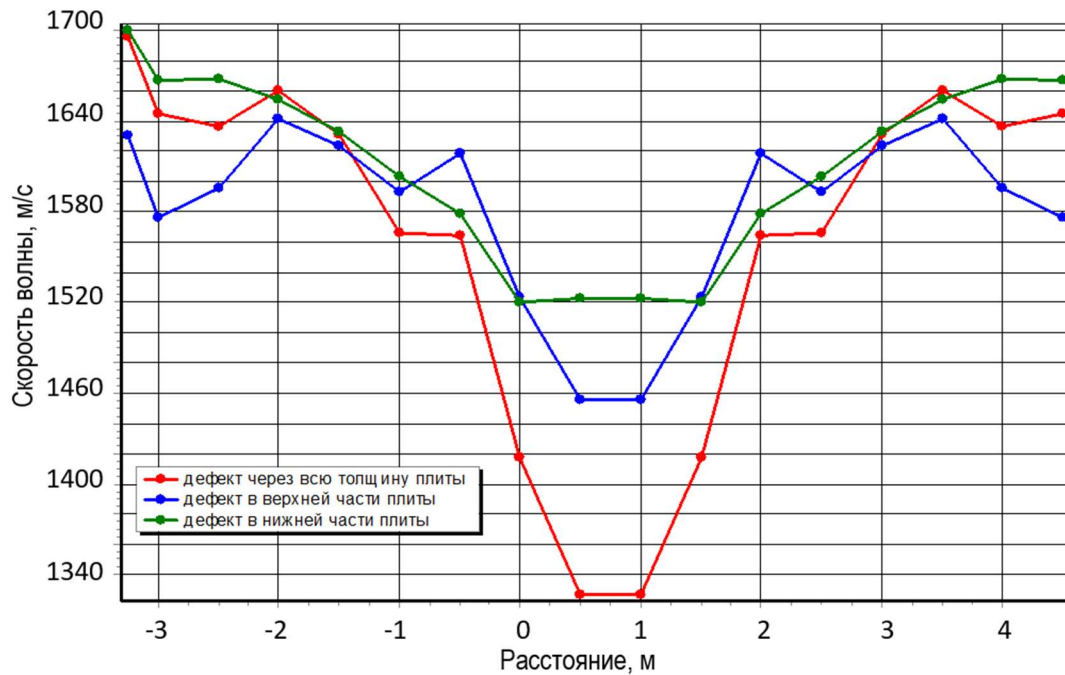


Рисунок 2.13. Годографы изменения скоростей изгибных волн в плите в диапазоне частот 500 – 2000 Гц (длины волн от 1 до 3 м)

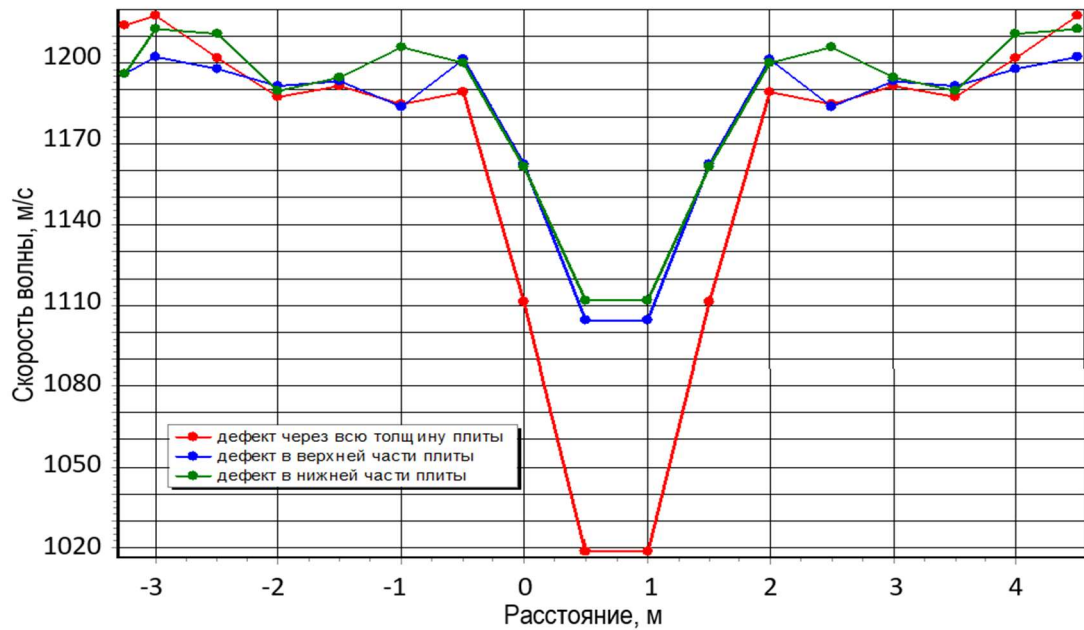


Рисунок 2.14. Годографы изменения скоростей изгибных волн в плите в диапазоне частот 200 – 500 Гц (длины волн от 3 до 5 м)

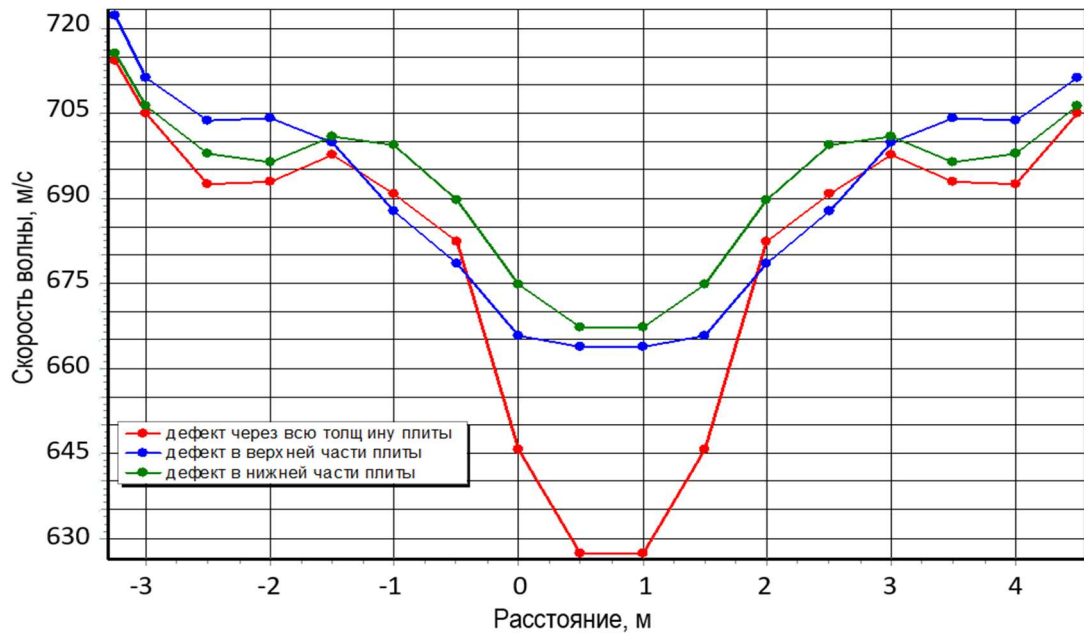


Рисунок 2.15. Годографы изменения скоростей изгибных волн в плите в диапазоне частот менее 200 Гц (длины волн более 5 м)

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что:

- При использовании волн с высокими частотами (короткие длины волн) скорость распространения волн на измеряемой поверхности практически не изменяется для 3-го случая. В остальных двух случаях скорость распространения волны на дефектном участке значительно снижается и имеет постоянное значение.

- С другой стороны, при использовании волн с длиной волны более 5 м скорость волны во всех случаях снижается в месте повреждения. Но разница между случаями 1,2 и 3 невелика (35-40м/с) и на практике очень сложно обнаружить и различить характеристики повреждения при использовании таких низкочастотных волн.

- При увеличении длины волны от 1 м до 5 м, в области имеющихся дефектов скорость волны в случаях 2 и 3 стремится к значению, приведенному в таблице 1. И это значение отличается от скорости распространения волны в случае 1.

Исследование распространения изгибных волн показало, что в принципе можно обнаружить дефекты и повреждения. Более того, оценка уменьшения скорости распространения волн позволяет приблизительно определить их размеры и местоположение. По полученным результатам при использовании оптимальных различных диапазонов частот можно достичь высокой эффективности оценки механических характеристик и выявления дефектов и повреждений строительных конструкций.

Экспериментальные исследования дисперсионных кривых на реальных объектах также показывают значительное влияние используемых частот на значения скорости распространения изгибных волн. На рис. 2.16 и 2.17 представлены дисперсионные кривые скоростей изгибных волн в зависимости от их длин.

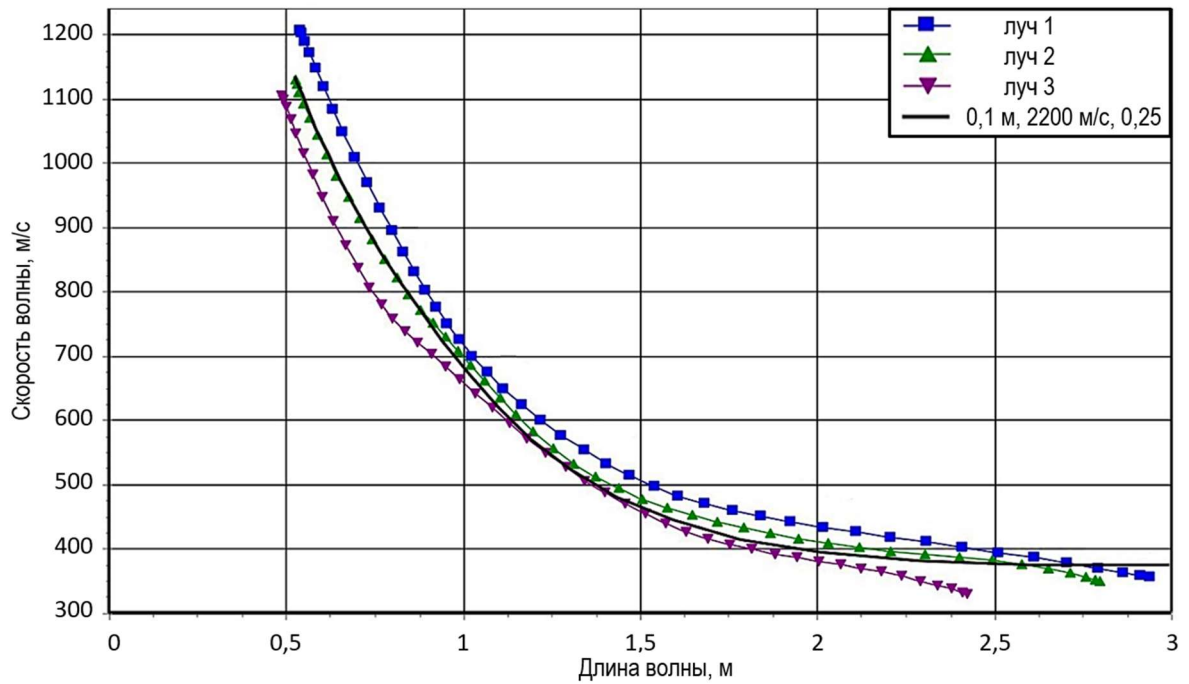


Рисунок 2.16. Дисперсионные кривые изгибных волн напольного покрытия цокольного этажа, расположенного по адресу: г. Москва, ул. Азовская, д. 24

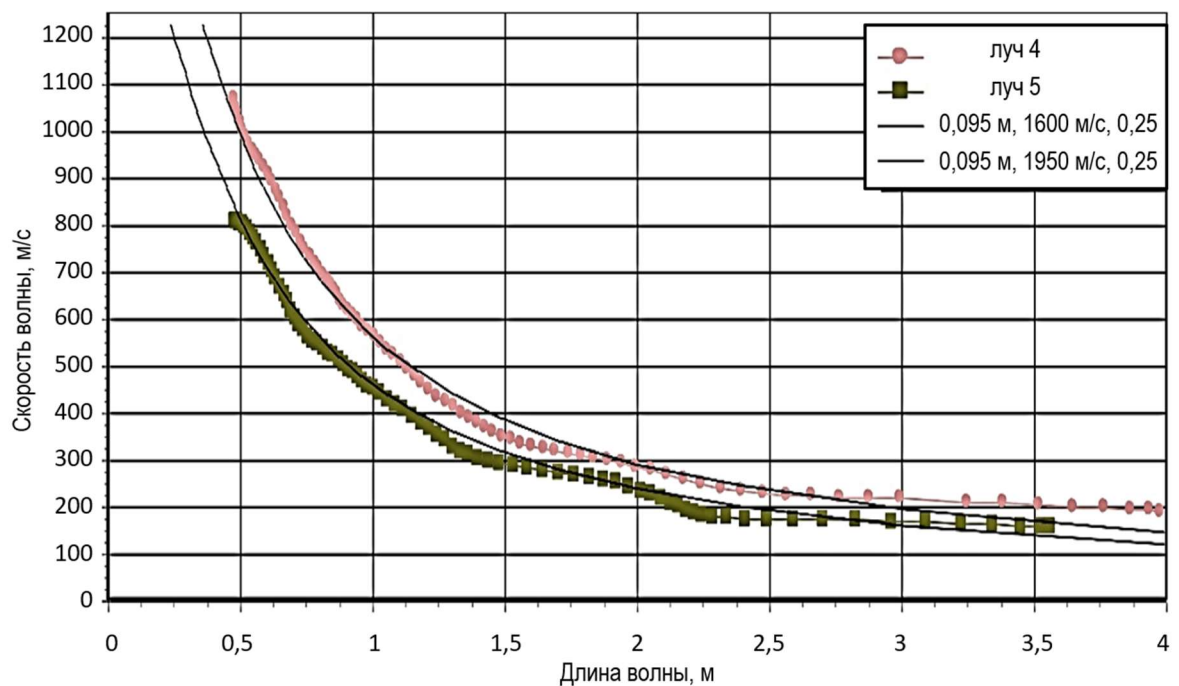


Рисунок 2.17. Дисперсионные кривые изгибных волн в плите перекрытия производство и склад (здание № 13), расположенного по адресу: Московская обл., Домодедовский р-н, п. Павлово.

Полученные практические и теоретические данные свидетельствуют, что с увеличением длины используемых волн точность результатов измерений скоростей их распространения снижается. На практике получается, что использование таких волн с отношением $\lambda/H > 10$ может привести к неверным результатам для оценки характеристик строительных материалов. При использовании в исследованиях таких низкочастотных диапазонов очень сложно обнаружить повреждения плитных конструкций и отличить их от неповрежденных [88].

Таким образом, на практике исследование распространения изгибных волн с целью оценки механических характеристик плоскостных каменных конструкций с помощью годографов скорости и определения их упругих характеристик в различных частотных диапазонах необходимо учитывать, что, чем больше используемая длина волны, тем меньше измеренная скорость распространения изгибных волн, что влияет на точность результатов определения характеристик материала. Также необходимо учесть, что, если длина волны существенно больше размера дефекта по длине измерительного луча, то происходит размывание границ дефекта, повреждений и занижение величины изменения скорости волны в нем. При этом согласно приведенным выше результатам исследований, для эффективности и полной оценки свойств материала плитных и стеновых конструкций рекомендуется использовать изгибные волны с отношением длин волн к толщине конструкциям не более 10.

2.5 Выводы по результатам проведенного анализа

Проведен теоретический анализ, позволивший создать модель распространения изгибных волн в строительных конструкциях при проведении обследования. При этом выделены основные параметры, определяющие особенности их использования. Это дисперсионные кривые фазовых скоростей и длина изгибной

волны. Еще одним фактором, влияющим на результаты, является толщина и упругие свойства обследуемых конструкций.

Рассмотрены особенности распространения упругих волн в кирпичных кладках. Для кирпичных кладок при использовании волн с длиной $\lambda \gg h = h_1 + h_2$ такая мелкослоистая среда, как кладка, может рассматриваться как однородная.

При решении уравнения (2.15) выявлена связь между скоростями изгибных волн, упруго-механическими характеристиками материалов, коэффициентом Пуассона и размерами конструкции. С этими данными получены результаты решения прямых задач для построения теоретических дисперсионных кривых либо годографов.

Для определения скоростей поверхностных волн предложена формула (2.23). Отсюда можно оценить механических свойств строительных материалов по корреляционным зависимостям между скоростью распространения упругих волн и механическими характеристиками, которые в качестве исходных данных пользуются для проектирования усиления или проведения реконструкции.

По полученным результатам теоретических и экспериментальных исследований было показано, что измерительный диапазон частот значительно влияет на скорости распространения изгибных волн. При этом для эффективной оценки упруго-механических характеристик, обнаружения дефектов и контроля размеров конструкции при обследовании здания и сооружения необходимо выбрать оптимальные диапазоны измерительных частот, которые очень важны для разработки методики проведения испытания и обработки данных экспериментальных результатов.

III. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКОСТНЫХ КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗГИБНЫХ ВОЛН

В главе рассмотрен метод определения механических характеристик материалов методом с использованием изгибных волн. Предложены методики проведения возбуждения для измерения изгибных волн в плоскостных каменных конструкциях и обработки экспериментальных реализаций. На основе этих данных и других результатов известных ученых разработана методика оценки параметров плоскостных каменных конструкций по дисперсионным кривым и годографам скоростей распространения изгибных волн.

3.1 Алгоритм определения акустических характеристик материалов строительных конструкций

Алгоритм обследования плоскостных каменных конструкций зависит от их конструктивных особенностей, условий доступа к поверхности и от возможностей применения тех или иных методов, а также от целей обследования. Если объект находится в аварийном или предаварийном состоянии и его несущие конструкции нуждаются в усилении или ведется контроль качества бетона при строительстве, т.е. обследование проводится с целью выявления дефектов, повреждений и оценки их характера и причин, то обследование проводится в наиболее полном объеме с использованием изгибных волн на различных диапазонах частот и алгоритмов обнаружения и идентификации локальных дефектов. В случае, если обследование ведется с целью подтверждения фактических параметров строительных материалов или продления ресурса эксплуатации объекта, то состояние бетона плиты или

кирпичных кладок стены может выборочно оцениваться с помощью только рэлевских поверхностных волн.

Полный алгоритм оценки акустических характеристик плоскостных каменных конструкций с использованием изгибных волн приведен в табл.3.1.

Таблица 3.1 - Алгоритм оценки акустических характеристик плоскостных каменных конструкций с использованием изгибных волн

№ п/п этапа	Этап работ	Получаемый результат
1.	Разработка исходной математической модели для расчета реакции конструкции на импульсное воздействие	Математическая модель для расчета реакции поверхности конструкции с исходными характеристиками на импульсное ударное воздействие
2.	Выполнение расчетов с помощью разработанных математических моделей	Реакции различных точек поверхности конструкции в математической модели на импульсное воздействие
3.	Обработка результатов моделирования реакции точек поверхности конструкции на ударное импульсное воздействие	1. Дисперсионные кривые изгибных волн на различных диапазонах частот (скорости распространения изгибных волн в зависимости от их длин с учетом исходных характеристик конструкций) 2. Годографы фазовой скорости распространения изгибных волн по длине измерительного створа.
4.	Экспериментальное определение реакции конструкции на импульсное воздействие	Реализации ударных импульсов и реакций на них в точках измерения на поверхности плиты либо стены
5.	Обработка результатов эксперимента и их предварительный анализ	1. Дисперсионные кривые изгибных волн. 2. Годографы фазовой скорости изгибных волн по длине измерительного створа. 3. Исходные данные для математической модели.

№ п/п этапа	Этап работ	Получаемый результат
6.	Сравнение экспериментальных и расчетных дисперсионных кривых и годографов	Результаты сравнительного анализа
7.	Адаптация математических моделей	Адаптированные математические модели, в том числе учитывающие наличие локальных дефектов
8.	Интерпретация результатов обследования, выдача результатов	Акустические и геометрические характеристики материалов плитной конструкции и стены, в том числе в дефектных зонах.

Исходная математическая модель (этап 1) может разрабатываться на основе технической документации, информации о начальных характеристиках конструкций, толщине плиты и стены, а также об имевших место дефектах, результатов предыдущих обследований и т.д. На этом этапе также могут быть смоделированы дефекты, которые следует выявлять в ходе обследования.

На 2-ом и 3-ем этапах выполняются расчеты реакций плиты и стены на импульсные воздействия и обработка результатов в соответствии с разработанной методикой. (Построение теоретических дисперсионных кривых скоростей изгибных волн в зависимости от их длин и годографов скоростей по длине измерительного створа)

Полученные результаты используются при продолжении работ по обследованию конструкции (этап 4): выборе оптимальных диапазонов частот, шага расстановки датчиков в измерительном створе, количества и мест расположения измерительных створов и т.д.

Результаты измерений обрабатываются (этап 5) следующим образом:

Исходные реализации волновых процессов, полученные при прямом и обратном направлениях распространения волны, разделяются при обработке на мо-

нохроматические пучки с помощью группы полосовых фильтров, полосы пропускания которых расположены на частотной оси с шагом 0,5 октавы и шириной полосы пропускания 0,5 октавы. По каждому отсчету времени распространения монохроматического пучка волны определяется фазовая скорость распространения волны $V_{\text{и}}$ и длина волны λ . Фазовая скорость этой волны имеет порядок значений фазовой скорости изгибной волны.

Сравнение экспериментальных и расчетных дисперсионных кривых и годографов (этап 6) выполняется с помощью программ визуализации графиков. Сравниваются графики дисперсионных кривых и, при необходимости, годографов скорости изгибных волн и по результатам этого сравнения делаются выводы о различиях в акустических и геометрических характеристиках на различных участках конструкции в реальном объекте.

По результатам сравнения назначаются изменения в модели, необходимые для достижения совпадения расчетных и экспериментальных дисперсионных кривых и годографов скорости (этап верификации расчетной модели).

Верификация математических моделей (этап 7) осуществляется методом итераций путем внесения в нее изменений, намеченных по результатам сравнительной оценки расчетных и экспериментальных дисперсионных кривых и годографов скорости, выполнения расчетов реакций плиты и стены на импульсные воздействия, обработки этих результатов и сравнения новых расчетных дисперсионных кривых и годографов скорости с экспериментальными. И так до тех пор, пока не будет достигнуто удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных дисперсионных кривых и годографов скорости.

Опытному специалисту обычно достаточно одной – двух итераций. При необходимости последовательность выполнения отдельных этапов может быть изменена. Например, если имеется опыт работ на аналогичных объектах, работы могут начинаться с 4-го этапа – экспериментального обследования.

Структура алгоритма разработанной методики принципиально не отличается от структуры алгоритма САПВ-метода. Вместе с тем, с целью устранения не-

достатков, присущих этому методу, предложены два принципиальных нововведения:

- анализ реакций поверхности конструкции на импульсное воздействие и получение данных для построения дисперсионной кривой осуществляется не в частотной, а во временной области, что позволяет оценивать скорость распространения волны только на тех временных интервалах, на которых еще не сказывается влияние волн, отраженных от жесткостных аномалий или границ обследуемой конструкции;
- для построения расчетных дисперсионных кривых создается математическая модель, воспроизводящая реакцию поверхности конструкции на импульсное воздействие в условиях, максимально приближенных к экспериментальным, а алгоритмы обработки расчетных и экспериментальных реализаций также идентичны, что позволяет подробно оценить механические характеристики строительных материалов по толщине конструкции и обнаружить дефекты и повреждения при сравнении экспериментальных и расчетных дисперсионных кривых и годографов скоростей распространения изгибных волн на различных диапазонах частот.

При разработке методики работа велась по следующим направлениям:

- разработка методики проведения экспериментального возбуждения и измерения изгибных волн в плоскостных каменных конструкциях;
- разработка методики обработки экспериментальных и расчетных реакций с целью построения дисперсионных кривых и годографов (графиков изменения по длине измерительного створа) скорости изгибных волн;
- исследование с помощью расчетных моделей точности разработанной методики и области ее применения: обнаружения локальных дефектов и оценки их геометрических и акустических параметров;
- апробация разработанных методик на реальных объектах.

3.2 Методики создания ударного импульса для возбуждения изгибных волн в плоскостных каменных конструкциях и обработки результатов измерения импульсных реализаций

Экспериментальное построение дисперсионных кривых изгибных волн выполняется в два этапа:

- создание импульсного возбуждения и измерение изгибных волн в конструкции, вызванных этим возбуждением;
- обработка полученных записей волновых процессов (реализаций) с целью построения дисперсионных кривых и голограмм скорости монохроматических волн по длине измерительного створа.

3.2.1. Импульсное возбуждение и измерение изгибных волн в конструкции

На первом этапе необходимо получить реализации колебаний поверхности конструкции под действием импульсной нагрузки, которые позволяли бы построить дисперсионные кривые требуемых мод изгибных волн в заданном диапазоне их длин волн. От этого зависят необходимые параметры ударного импульса (амплитуда и длительность импульса силы), база измерения, расстояние от точки удара до ближайшего датчика.

При необходимости могут проводиться измерения с разными параметрами ударного импульса для получения различных длин волн. При этом ударное усилие создается специализированным инструментом, либо непосредственно на поверхности конструкции, либо через резиновую прокладку. Практики показали, что при использовании ударника из пород дерева без прокладки можно генерировать волны в диапазоне частот от 25-30 Гц до 2-3 кГц. Для расширения диапазона

частот возбуждаемых колебаний до 3-5 кГц необходимо использовать металлический ударник с тонкой прокладкой из брезента или жесткой пластмассы.

Схема измерений зависит от рабочего диапазона длин волн и, соответственно, частот колебаний. Схемы возбуждения и измерения колебаний поверхности конструкции с целью получения акустических характеристик изгибных волн приведены на рис. 3.1. Измерительные датчик-акселерометры, как правило, расставляются в линию с постоянным шагом и образуют измерительный луч. Шаг расстановки датчиков должен быть не больше минимальной длины анализируемых волн (возбуждаемого диапазона частот). Это требование связано с необходимостью прослеживать распространения волны вдоль луча. Если на расстоянии между соседними точками измерения укладывается больше одной длины волны, то возникает неоднозначность результата измерения, так как голограф времен распространения волны может быть построен с ошибкой в период волны на базе между соседними точками измерения. Количество датчиков в луче должно быть не менее двух, однако реально с целью увеличения базы измерения и повышения тем самым точности построения дисперсионных кривых обычно луч состоит из 5-7 датчиков.

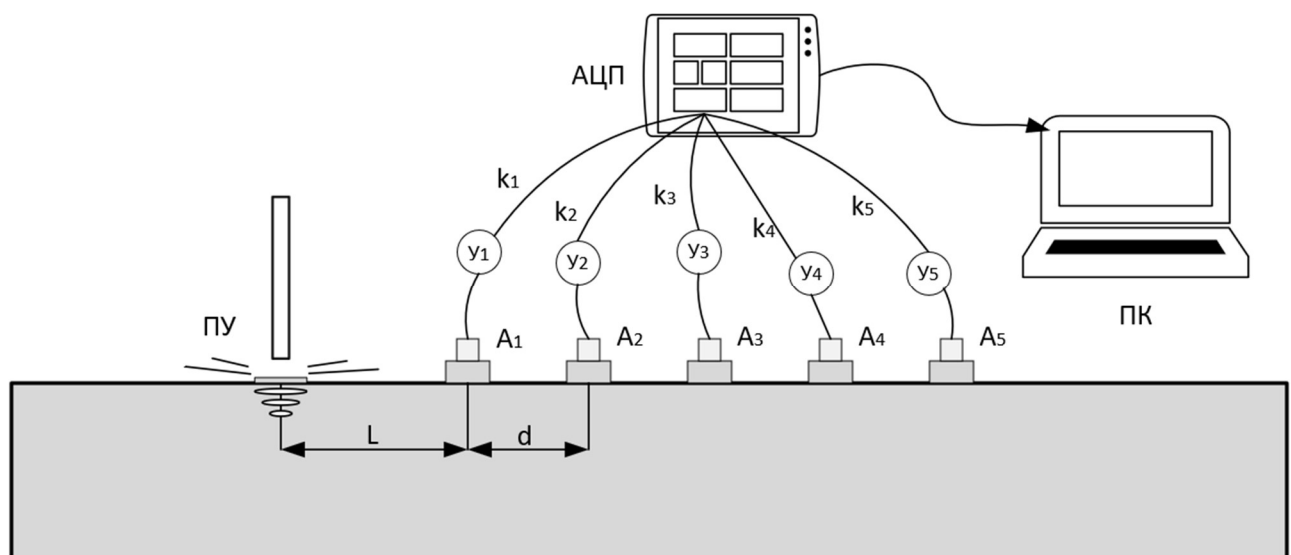


Рисунок 3.1. Схема проведения эксперимента

A_1 - A_5 - акселерометры; ПУ - точки приложения ударов; k_1 - k_5 - антивибрационные кабели; Y_1 - Y_5 - согласующие усилители; АЦП - аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер;

Как показали результаты измерений на конструкциях, решающее значение для точности построения дисперсионных кривых имеет правильный выбор расстояния от точки приложения воздействия до начала измерительного луча. Слишком большое расстояние приводит к снижению амплитуды колебаний и влиянию на скорости распространения волны, следовательно, искажению дисперсионной кривой.

Недостаточное расстояние от точки приложения нагрузки до начала измерительного луча также может приводить к искажению формы дисперсионной кривой. Это объясняется тем, что изгибная волна не успевает сформироваться и распространяется в поверхностном слое. Принцип формирования и распространения волны Лэмба представлен на рис. 3.2.

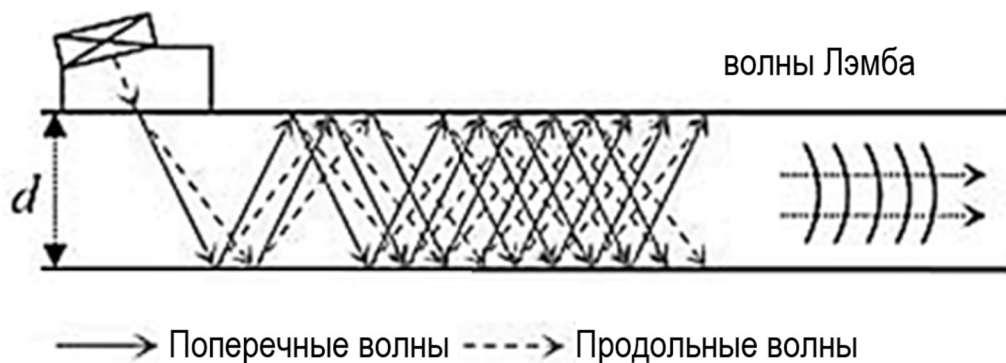


Рисунок 3.2. Принцип формирования и распространения волны Лэмба [108]

Кроме того, при обследовании реальных конструкций необходимо учитывать, что ширина фронта волны, оказывающая влияние на колебания в каждой точке измерения составляет около одной длины волны, т.е. любая неоднородность характеристик материала, или изменение геометрических параметров конструкции (изменение ее толщины, ребра жесткости и т.д.) находящиеся на расстоянии менее 0,5 длины волны от измерительного луча, будет влиять на скорость распространения волны вдоль измерительного луча.

Таким образом, при экспериментальном определении реакции плоскостных конструкций а на ударное воздействие количество и тип первичных измеритель-

ных преобразователей, шаг их расстановки вдоль измерительного луча, места приложения ударной нагрузки и тип ударника (его масса и жесткость наконечника) выбирают с учётом реального доступа к обделке, а также с таким расчетом, чтобы наиболее полно выявить акустические характеристики материалов обследуемой конструкции. Акселерометры расставляются в линию, обычно с постоянным шагом, не превышающим минимальную длину измерительных волн. При выборе требуемого диапазона длин волн исходят из задач обследования, геометрических размеров конструкций, ожидаемых характеристик материалов. Максимальная длина волны выбирается в зависимости от требуемой глубины зондирования и соотношения акустических характеристик различных слоев конструкции.

Измерения с целью построения дисперсионных кривых и (или) годографов скоростей изгибных волн в конструкции выполняются в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.1. Для построения дисперсионных кривых назначают отдельные измерительные лучи в различных частях поверхности конструкции, а для построения годографов скоростей (при поиске локальных, расположенных на ограниченной площади поверхности дефектов или аномалий) назначают измерительные створы (один или несколько), образуемые несколькими измерительными лучами. При этом измерительные лучи располагаются на одной прямой и при каждой следующей перестановке смещаются относительно друг друга вдоль измерительного створа на расстояние, равное одному-двум шагам расстановки датчиков. В случае, когда ведется поиск только крупных дефектов, размеры которых в плоскости параллельной поверхности конструкции в области расположения измерительного луча сравнимы с длиной луча, возможно смещение каждого нового луча в створе на расстояние, равное длине луча (первый датчик нового луча устанавливается на место последнего датчика предыдущего). Более частый шаг смещения измерительных лучей (на 1-2 шага расстановки датчиков при 5-7 датчиках в луче) необходим для повышения точности построения годографов скорости. В результате годограф скорости распространения волны для разных интервалов между точками измерения даже в простейших случаях, например однородной плиты, не является прямой линией. Таким образом, усреднение по каждому ин-

тервалу между соседними точками измерения скоростей волны позволяет повысить точности измерений и существенно снизить влияние волн-помех на результаты обследования.

Для экспериментального возбуждения и измерения изгибных волн использовался информационно-измерительный комплекс, приведенный на рис. 3.1. Технические характеристики аппаратуры, входящей в информационно-измерительный комплекс, приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2 - Технические характеристики аппаратуры, входящей в измерительный комплекс

№ п/п	Название и обозначение по блок-схеме измерений	Тип производителя	Технические характеристики
1.	Пьезоэлектрический акселерометр, А1-А _п	КД – 20, MMFR, Германия	Чувствительность 10 мВ/м/с ² ; резонансная частота 15 кГц
		КД – 13, MMFR, Германия	Чувствительность 5 мВ/м/с ² ; резонансная частота 25 кГц
		КВ – 12, MMFR, Германия	Чувствительность 300 мВ/м/с ² ; резонансная частота 300 Гц
		А 1633, А 1613, ЗАО «Геоакустика», Россия	Со встроенным предусилителем, чувствительность 1,1 В/м/с ² , Резонансная частота 1,2 кГц А 1633 - трехкомпонентный
2.	Усилитель, У1-У _п	00028 ROBOTRON, Германия	Режимы измерения: ускорение, скорость, перемещение; усиление от 1 до 10000 со ступенчатым изменением с шагом 10 дБ; частотный диапазон от 1 Гц до 20 кГц; количество каналов из-

№ п/п	Название и обозначение по блок-схеме измерений	Тип производителя	Технические характеристики
			мерения – 10; питание от сети 220 В или аккумулятора 12 В постоянного тока
3.	Аналого-цифровой преобразователь, АЦП	E440, L – card, Россия	Количество каналов – 16, разрядность – 12 бит, максимальная частота преобразования – 400 кГц/канал
4.	Персональный компьютер, ПК	NOTEBOOK	Оснащен программным обеспечением ввода и обработки измерительной информации
5.	Ударник		Из твердых пород дерева без прокладки либо металлического ударника с тонкой прокладкой из брезента или жесткой пластмассы

Тип применяемых акселерометров выбирался в зависимости от частотного диапазона измеряемых волн. Так при измерении Релеевских и изгибных волн (частотный диапазон, обычно от 2-3 кГц до 100-400 Гц в зависимости от свойства и размеров конструкции). При частотах колебаний меньше 400 Гц использовались акселерометры А 1613 или А1633, а при частотах ниже 100-150 Гц могли использоваться также акселерометры КВ-12.

Параметры ударника также зависят от типа анализируемых волн и их частотного диапазона. Так, для возбуждения Релеевских и изгибных волн обычно достаточно использовать груз массой 15-20 кг. Обычно для этих целей использовался деревянный брус или бревно. Достоинство такого ударника в том, что удар получается достаточно жестким для возбуждения колебаний с частотой до 2-3 кГц.

В случае необходимости возбуждения длинных волн при обследовании плиты большой толщины (несколько метров) применяется ударник, который для снижения амплитуды высокочастотных колебаний снабжается упругим наконечником из резины или полиуретана.

Возбуждение и измерение волн выполняется следующим образом:

- собирается измерительная схема и устанавливаются акселерометры на поверхность конструкции в соответствии с выбираемой схемой расстановки (они закрепляются с помощью пластилина, оконной замазки или другой мастики) и, при необходимости, на ударнике (обычно на торце, противоположном контактной поверхности с помощью шпильки или штыря, входящих в комплект датчика);
- наносятся 5-10 ударов в одной из намеченных точек приложения нагрузки (количество ударов выбирают исходя из уровня микросейсмических шумов на измеряемой поверхности и амплитуд возбужденных ударом волн) и регистрируют реакции на них во всех точках измерения;
- аналогично проводят измерения при ударах во всех точках приложения нагрузки, предусмотренных схемой испытаний.

Как правило, измерения проводят как при прямом (от A_1 к A_5 , см. рис. 3.1), так и обратном (от A_5 к A_1) направлениях распространения волны, для чего удары наносят как слева, так и справа от луча (точки удара ПУ схеме рис. 3.1). Это позволяет повысить точность построения дисперсионных кривых, а при построении годографа скорости волны по длине измерительного створа – также точнее идентифицировать дефекты путем сравнения годографов распространения волны в противоположных направлениях.

Построение дисперсионных кривых поверхностных волн, в отличие от метода САПВ, ведется на основе непосредственного анализа годографов распространения волн вдоль измерительного луча. Это позволяет при обработке использовать только те временные участки реакций поверхности конструкций на ударное воздействие, на которых амплитуда этих реакций существенно выше микросейсмических помех и отсутствует влияние волн, отраженных от преград или дефектов.

3.2.2. Обработка экспериментальных реализаций

Обработка экспериментальных реализаций проводится в несколько этапов.

1. Исходные реализации волновых процессов, полученные при прямом и обратном направлениях распространения волны, разделяются при обработке на монохроматические пучки с помощью группы полосовых фильтров, полосы пропускания которых расположены на частотной оси с шагом 0,5 октавы и шириной полосы пропускания 0,5 октавы. Пример распространения изгибающей волны по измерительному лучу и выделенных монохроматических пучков этой волны при различных частотах фильтров приведен на рис. 3.3-3.4.

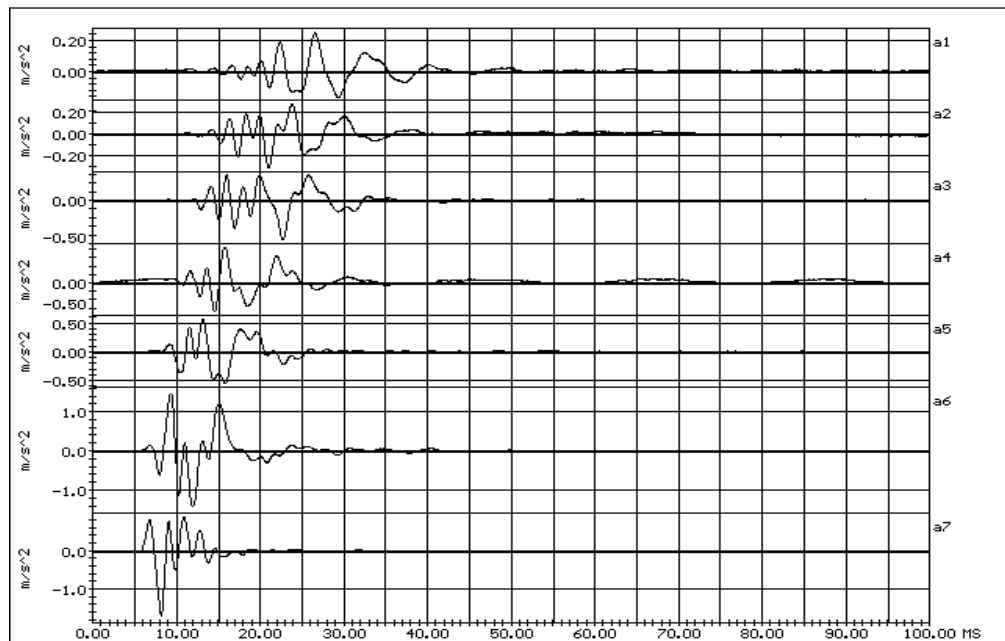


Рисунок 3.3. Исходные реализации волновых процессов

2. Затем по каждому монохроматическому пучку строятся годографы распространения волны (см. рис. 3.4). Годографы строятся по максимумам (положительным и отрицательным) колебаний или реже по точкам пересечения графиком колебаний нулевой линии.

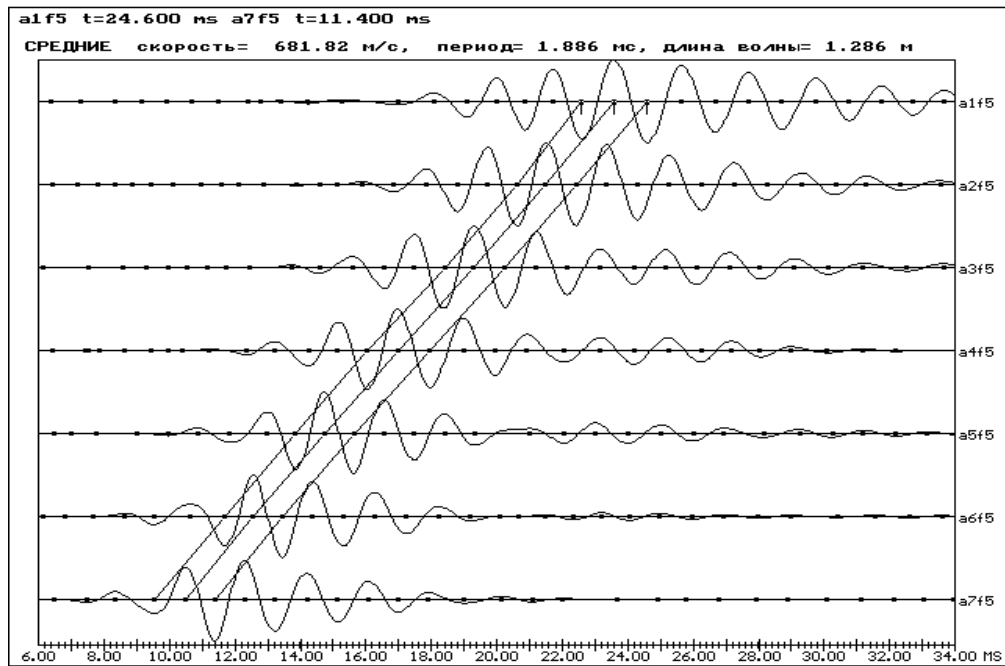


Рисунок 3.4. Пример выделенных монохроматических пучков

По каждому годографу определяются:

- времена пробега между соседними точками измерения и всему измерительному лучу;
- периоды колебаний в каждой точке измерения как интервалы времени между максимумами, ближайшими к тому, через который проходит годограф (рис. 3.4);
- средняя фазовая скорость волны по лучу определяется по формуле

$$V = L / t \quad \text{м/с} \quad (3.1)$$

где L - длина луча, м;

t - время пробега волны от начала до конца луча, с;

- средний период колебаний по всем точкам измерения

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad \text{с} \quad (3.2)$$

где T_i - период колебаний в i -той точке измерения, с;

n - количество точек измерения

- длина волны

$$\lambda = T \times V \quad \text{м} \quad (3.3)$$

3. Результаты, полученные по всем годографам, построенным для всех выделенных монохроматических пучков, сводятся в две таблицы:
- средних скоростей и длин волн, используемых для построения дисперсионных кривых:
 - времен пробега и периода колебаний волны по каждому интервалу между соседними точками измерения, используемых для построения годографов скорости распространения волны.
4. Для построения дисперсионных кривых используется массив данных в координатах «скорость волны – ее длина», пример которого приведен на рис. 3.5. Для построения годографов скорости волны по длине створа используется массив данных в координатах «время пробега волны между соседними точками измерения – период колебаний в волне», пример которого приведен на рис. 3.6.

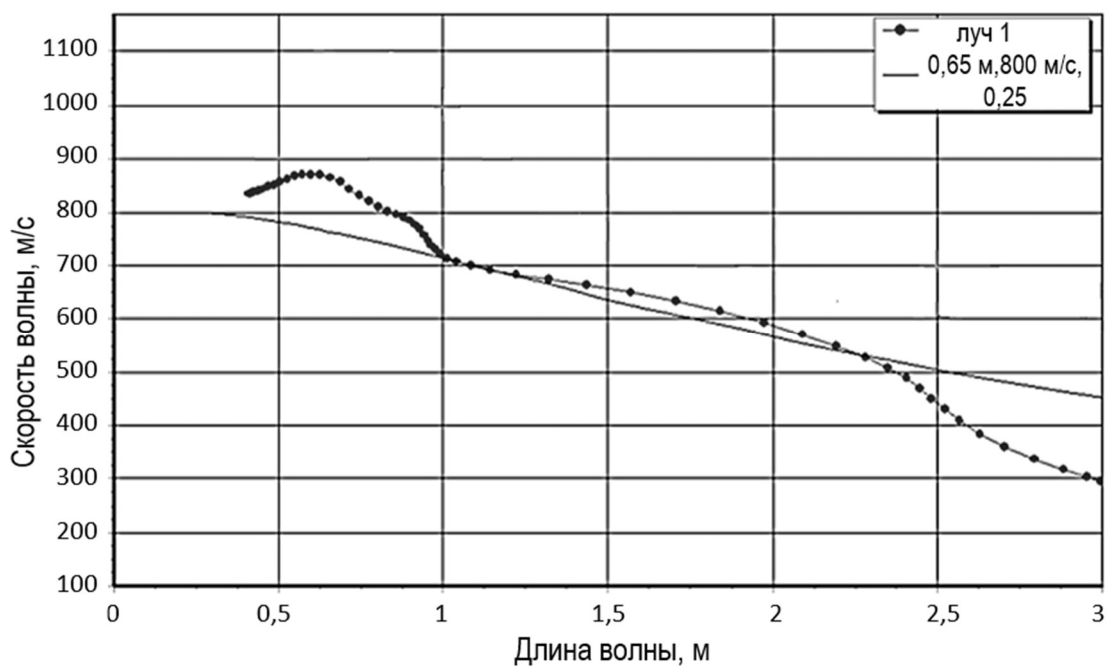


Рисунок 3.5. Пример дисперсионной кривой изгибных волн в конструкции

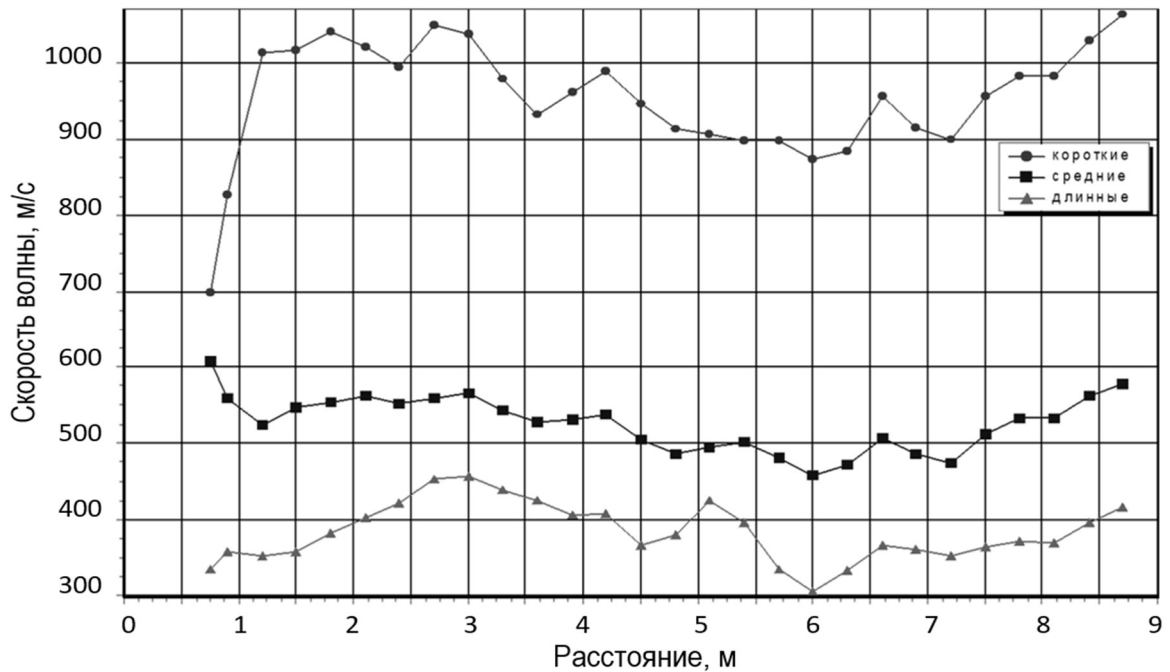


Рисунок 3.6. Пример годограф волн различной длины

3.3 Методика оценки механических характеристик плоскостных каменных конструкций по дисперсионным кривым и годографам скоростей изгибных волн

3.3.1 Определение упругих и прочностных характеристик плоскостных каменных конструкций

Метод определения механических характеристик плоскостных каменных конструкций основан на связи скоростей распространения упругих волн с упругими и прочностными характеристиками материалов строительных конструкций. При этом скорости распространения упругих волн и упругие характеристики строительных материалов определяются по следующим формулам:

$$V_p = \sqrt{\frac{2(1-\mu_d)}{1-2\mu_d}} \cdot \frac{1+\mu_d}{0,87+1,12\mu_d} V_R \quad (3.4)$$

$$V_R = \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} V_s \quad (3.5)$$

$$E_d = \rho V_P^2 \frac{(1 + \mu_d) \cdot (1 - 2\mu_d)}{1 - \mu_d} = \rho V_R^2 \frac{2(1 + \mu_d)^3}{(0,87 + 1,12\mu_d)^2}; \quad (3.6)$$

$$G_d = \rho V_s^2 = \rho V_R^2 \left(\frac{1 + \mu_d}{0,87 + 1,12\mu_d} \right)^2, \quad (3.7)$$

Прочности бетона и кирпичных кладок по скорости продольной волны оценивается с помощью градуировочной кривой для бетона (см. рис. 3.7) и таблицы классификации прочности кладки по скоростям продольных волн (см. табл. 3.3).

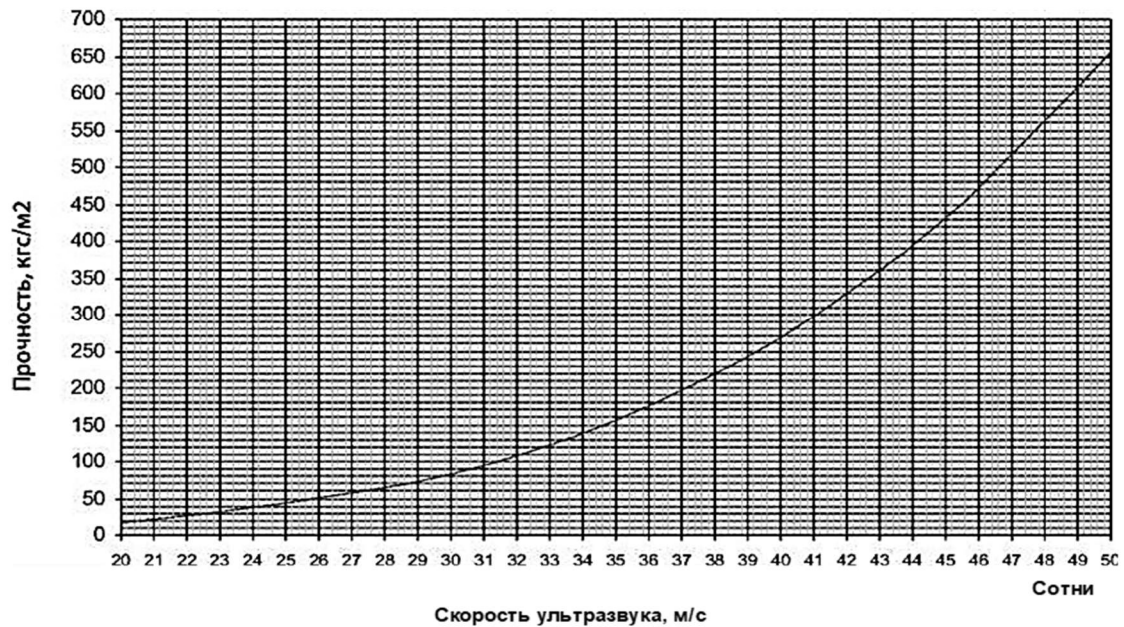


Рисунок 3.7. Градуировочная кривая для оценки прочности бетона

Таблица 3.3 - Качественная классификация нормативной прочности кладки по скоростям продольных волн сейсмоакустического диапазона частот

Характеристика кладки	R_n , МПа	V_p , м/с
Очень прочная	4...4,5	> 3000
Прочная	3...4	2000...3000
Пониженной прочности	2...3	1500...2000
Низкой прочности	1,5...2	1000...1500
Слабой прочности	1...1,5	500...1000

Характеристика кладки	R_n , МПа	V_p , м/с
Очень слабой прочности	0,5...1	~500

Известно, что динамический коэффициент Пуассона по величине больше, чем статический. Определение динамического коэффициента Пуассона для кирпичной кладки и бетона длительно эксплуатируемого здания является серьезной проблемой, которую мы не рассматриваем в рамках этого исследования. Но учитывая, что $\mu_d = 0,20-0,30$, и используя формулу (3.6) и (3.7), можно утверждать, что ошибка в оценке упругих характеристик не может быть выше, чем $\pm 2-3\%$.

По результатам экспериментального обследования построены дисперсионные кривые и определены скорости распространения рэлеевской волны двумя способами (путем экстраполяции в область коротких длин волн с помощью математического модели, который представлено в разделе 2.3 и по предложенной формуле (2.23) при обработке результата испытаний в диапазоне частот при выполнении условия $0,4 < V_n/V_R < 0,7$). При значительном отличии результатов между этими двумя способами (больше 10%) необходимо пересматривать и снова уточнять параметры расчетной модели. Параметры акустические модели строительной конструкции подбираются методом итераций и с учетом известных данных до достижения наилучшего совпадения теоретической и экспериментальной дисперсионных кривых. Т.к. на самом деле каменные, бетонные и железобетонные конструкции не являются полностью однородными и могут иметь значительные различия в свойствах строительных материалов поверхностных и внутренних слоях конструкций.

После определения скорости рэлеевской волны в материале стен и плиты, используя теорию упругости, легко найти значение скорости продольной волны и определить механические характеристики материалов конструкций. Из уравнения (2.19) и (3.6) динамический модуль упругости материалов при $\mu_d = 0,25$ возможно вычисляют по уравнению:

$$E_d = 2,95\rho V_n^2 \left(0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H}\right)^2 \quad (3.8)$$

Тогда среднее значение динамического модуля упругости вычисляют по формуле:

$$\bar{E}_d = 2,95 \rho \bar{V}_R^2 \quad (3.9)$$

Где $\bar{V}_R$ - среднее значение скорости рэлеевской волны определяется по формуле (2.23).

Кроме того, другие виды сравнительного анализа заключаются в исследовании свойств строительных материалов на больших и протяженных участках с целью выявления слабых зон. При этом для обнаружения дефектов и повреждений на протяженных участках необходимо построить годографы распространения изгибных волн. Эта графика позволяет уточнить скорость распространения упругих волн, которая соответствует жесткостной характеристике материалов. Из уравнений (2.22) и (3.4) выражение связи между фазовой скоростей изгибных волн и продольной скоростей при $\mu_d = 0,25$ представлено в таком виде:

$$V_p = 1,88 V_n (0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H}) \quad (3.10)$$

На рисунке 3.8 показан пример результатов оценки скоростей распространения изгибных волн, измеренных в одном измерительном створе на прямой линии длиной 10 м при $\lambda/H \approx 3$.

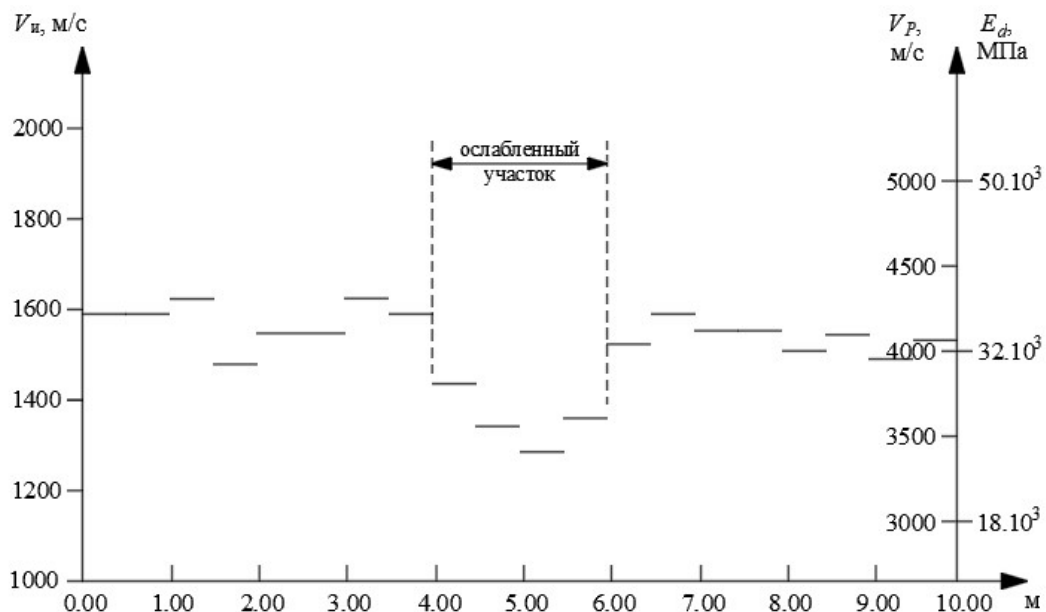


Рисунок 3.8. Пример результатов скоростей распространения изгибных волн по створам

При измерении в разных направлениях построена карта скоростей распространения упругих волн, которая четко показывает дефекты и повреждения. Любое уменьшение скорости волн является показателем существования дефектной либо поврежденной зоны. Пример представлен на рисунке 3.9:

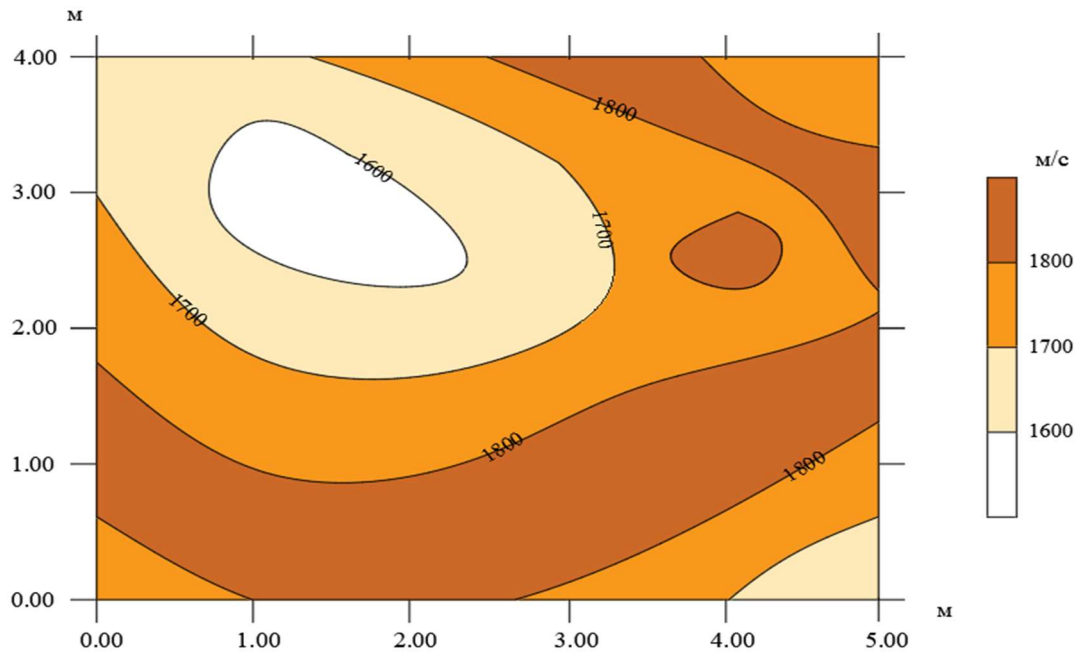


Рисунок 3.9. Пример результатов расчета средней скоростей распространения рэлеевской волны на бетонной плите

Установлено, что с увеличением длины волны точность результатов, полученных при измерении скорости распространения изгибных волн, снижается. В связи с этим важную роль играет проблема использования подходящего диапазона распространения волн. При этом необходимо учесть диапазон частот при проведении испытания и обработки данных экспериментальных результатов, приведенный в разделе 2.3 и 3.2, который позволяет получить сведения, относящиеся к материалу по всей толщине, а не исключительно свойствами поверхностного слоя.

3.3.2 Оценка состояния плоскостных каменных конструкций по их толщине.

Поскольку изгибные волны в плоскостных каменных конструкциях распространяются с разной фазовой скоростью, то они отличаются от ультразвуковых волн длиной волны, скоростью распространения и интенсивностью затухания. Это отличие, с одной стороны, снижает разрешающую способность основанных на их использовании методов, но с другой — позволяет снизить затухание волн и тем самым увеличить базы измерений, а также глубину зондажа при одностороннем доступе к конструкции. Некоторые примеры результатов обследования измерения с использованием изгибных волн приведены ниже. На рис. 3.10 - 3.12 приведены дисперсионные кривые, полученные в массиве железобетона толщиной 1,7 м для различных характеристик бетона по толщине конструкции. Там же приведены теоретические дисперсионные кривые поверхностных волн для однородной по толщине плиты (сплошные линии).

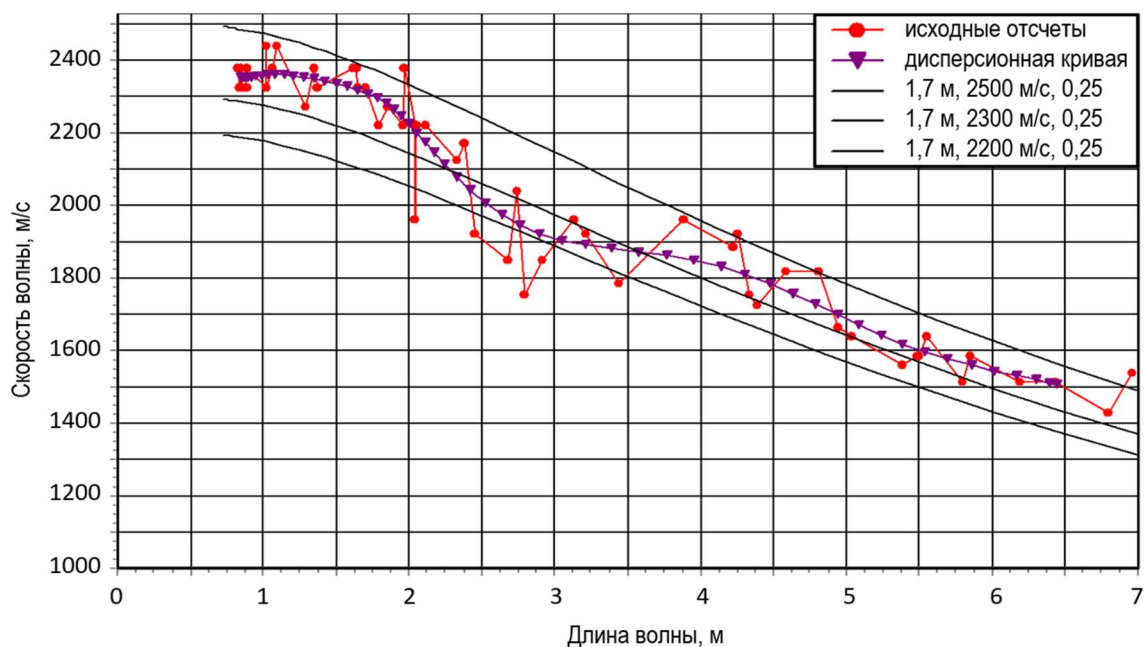


Рисунок 3.10. Дисперсионная кривая для массива с постоянными по толщине конструкции характеристиками бетона

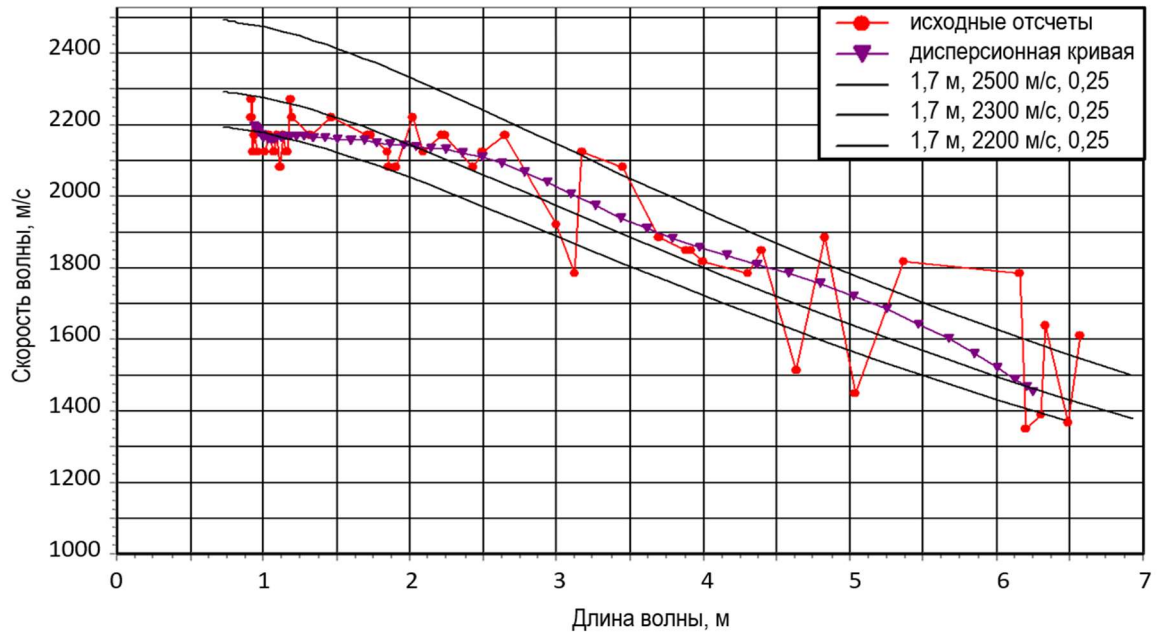


Рисунок 3.11. Дисперсионная кривая массива с ослабленным поверхностным слоем бетона

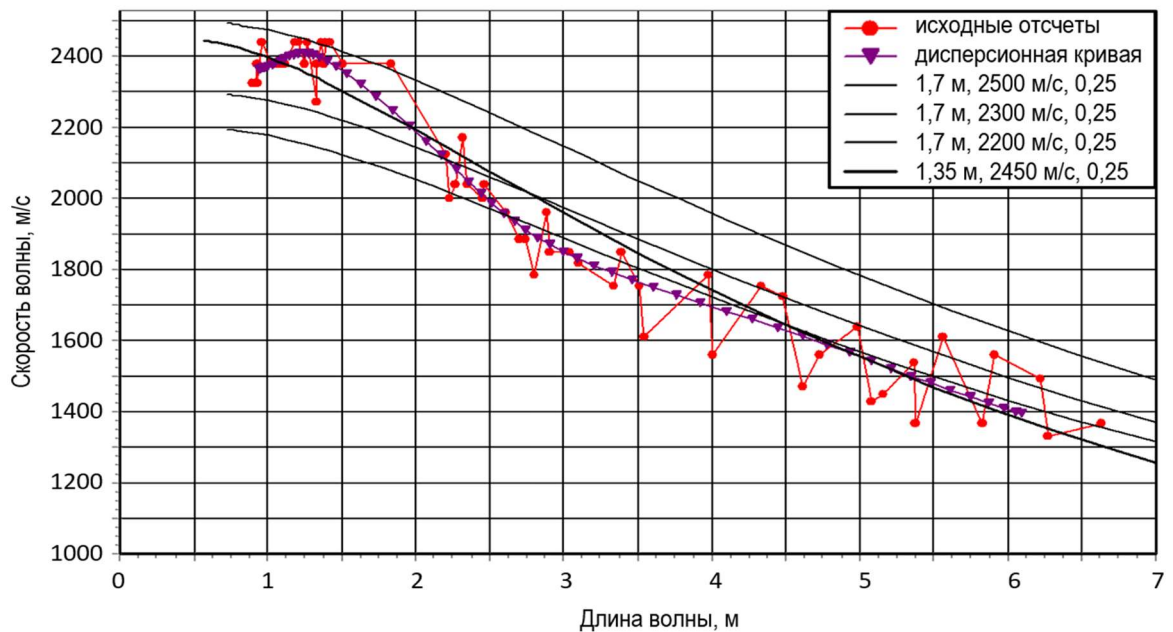


Рисунок 3.12. Дисперсионная кривая для массива с ослабленным слоем бетона в глубине массива

При наблюдении скоростей распространения изгибных волн и необходимо учесть все отсчеты в разных диапазонах длин и сравнить их с теоретическими дисперсионными кривыми. Тогда с использованием изгибных волн можно не

только оценивать состояние массива в целом, но и для толстостенных конструкций также оценивать механические характеристики отдельных слоев, что является практически невозможным другими методами.

Кроме того, метод с использованием изгибных волн позволяет контролировать проектную толщину плитных, стеновых и фундаментных конструкций, а также может использоваться для обследования подпорной стены и заобделочного пространства подземных сооружений. При этом есть возможность определить зоны отслоения массивной бетонной плиты и толстостенной кладки и также выявить ориентировочное место нахождения дефектов и повреждений.

3.4 Выводы

Предложенный метод оценки параметров материалов строительных конструкций отличается от известных тем, что построение дисперсионной кривой осуществляется не в частотной, а во временной области, и позволяет оценивать скорость распространения волны только на тех временных интервалах, на которых еще не сказывается влияние волн, отраженных от жесткостных аномалий или границ обследуемой конструкции.

Разработаны методики возбуждения изгибных волн в плоскостных каменных конструкциях и обработки импульсных реализаций, позволяющие надежно и с требуемой точностью построить дисперсионные кривые и годографы.

Предложена методика обследования плоскостных каменных конструкций по дисперсионным кривым и годографам изгибных волн, которая позволяет определить прочностные и упругих характеристики по корреляционным зависимостям со скоростью распространения упругих волн.

При использовании изгибных волн с различного диапазона частот предложенный метод также возможен дает возможность контролировать механических характеристик конструкций по толщине, используя значения скоростей распро-

странения изгибных волн при сравнении с теоретическими дисперсионными кривыми.

Применение изгибных волн также возможно для контроля проектной толщины конструкции, определения зоны отслоения массивной бетонной плиты и толстостенной кладки (Например, при примыкании глухих стен зданий друг к другу). Кроме того, появляется возможность выявлять локальные дефекты и определять их ориентировочное место положения.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКОСТНЫХ КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В главе представлены результаты опытной апробации разработанной методики с использованием изгибных волн. Определены акустические характеристики в плоскостных каменных конструкциях. На основе этого проведены оценки прочностных характеристик кирпичной кладки существующего объекта. Экспериментальные исследования, проведенные по предложенной методике, подтвердили способность контроля проектной толщины и оценки механических характеристик по толщине конструкции при доступе только с одной стороны. Также представлены результаты измерений для сводной конструкции с целью оценки проектных толщин и акустических характеристик. Намечены направления дальнейших исследований.

4.1. Экспериментальная испытательная установка

Разработанная методика было подвергнута экспериментальной проверке на конструкциях зданий и сооружений. Объектами проверки стали бетонные плиты и кирпичные стены существующих зданий и сооружений в городах Москве и Санкт-Петербурге. Для каждого объекта исследования измерения проводились исходя из конкретных характеристик и ожидаемых результатов. При этом использовался комплекс оборудования, который представлен в рисунке 4.1.

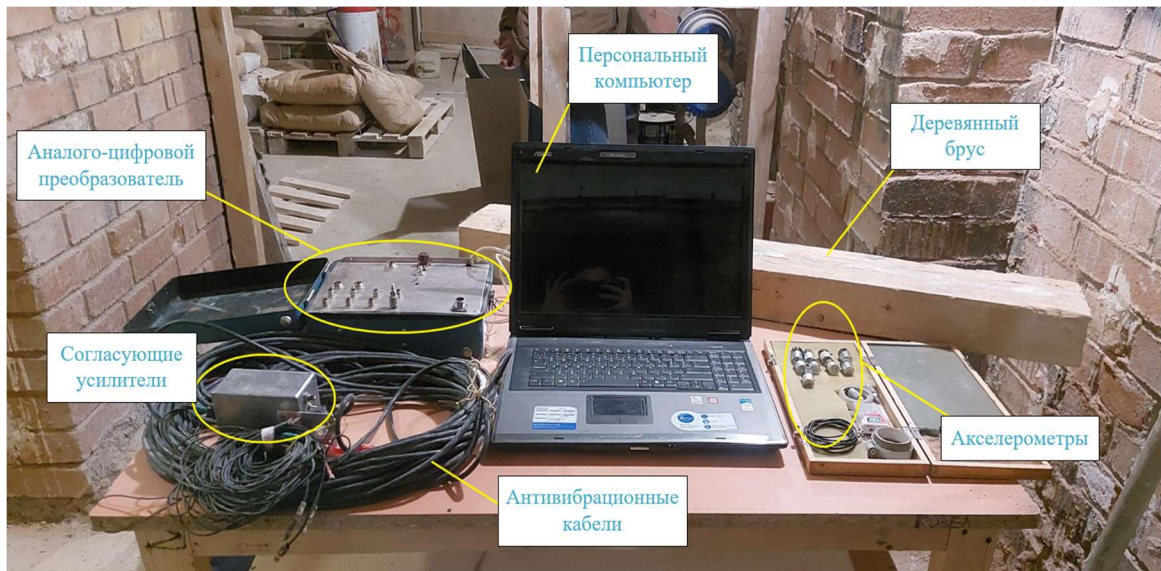


Рисунок 4.1. Датчики и регистрирующая аппаратура типового измерительного комплекса

На рисунке 4.2. приведена схема экспериментального измерительного комплекса. Измерительная схема представляет собой последовательное соединение первичных измерительных преобразователей (акселерометров), согласующих усилителей, многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и персонального компьютера (ПК). Для возбуждения волн различной длины несколько ударов наносилось непосредственно по поверхности конструкции или через резиновую прокладку.

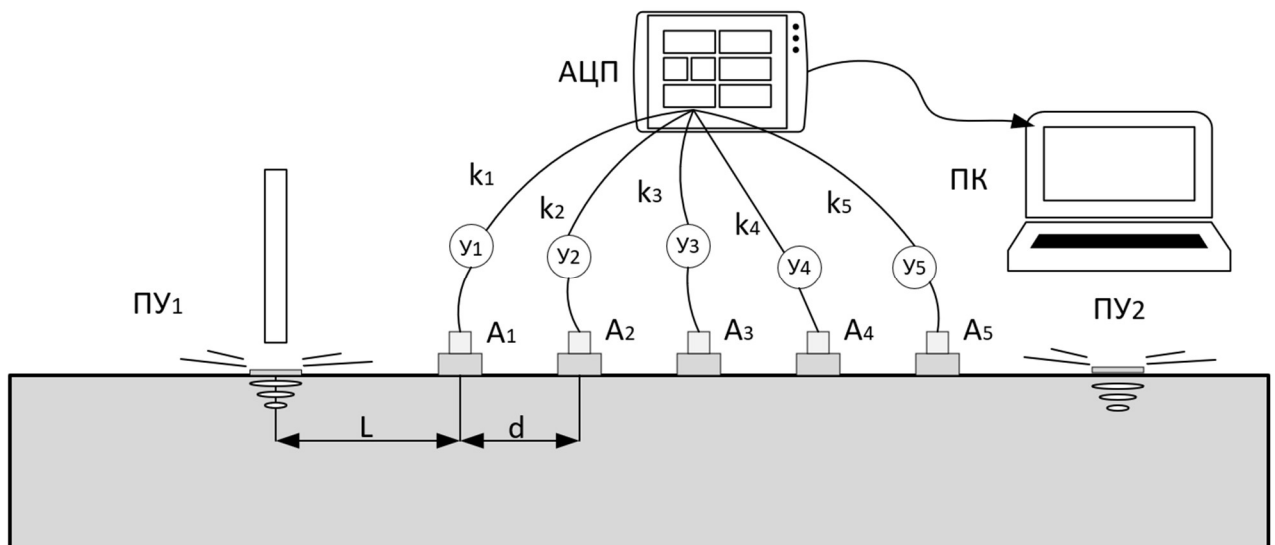


Рисунок 4.2. Схема проведения измерений

Как видно на фотографиях (рис. 4.1), в качестве ударника используется деревянный брус. Такой ударник используется для возбуждения Рэлеевских и изгибных волн. Основное достоинство деревянного ударника состоит в том, что удар получается достаточно жестким для возбуждения колебаний с частотой от 25-30 Гц до 2-3 кГц. Дополнительно для улучшения визуального представления волнового поля используются согласующие усилители сигналов.

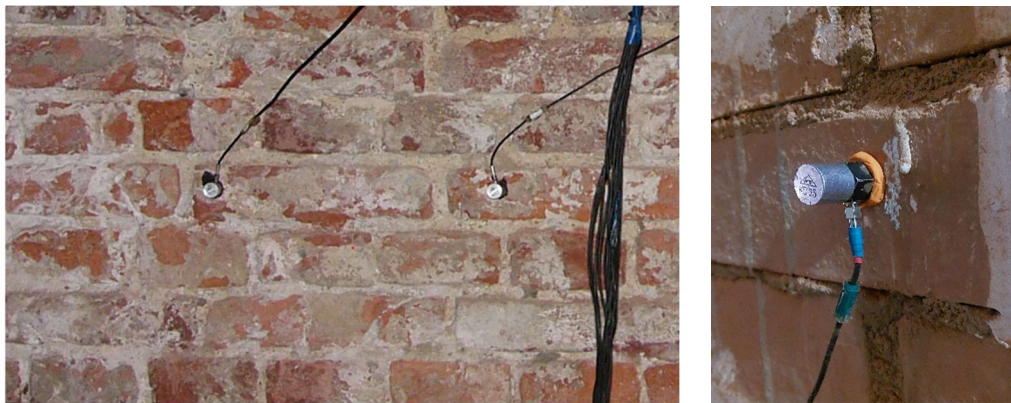


Рисунок 4.3. Датчики-акселерометры, установленные на поверхности стены обследуемых объектов

Поверхность мест установки акселерометров подготавливают для установки датчиков, очищая от пыли, отслоившейся краски, и т.п., при необходимости просушивают и покрывают ее тонким слоем пластилина или специальной мастики (см. рис.4.3). Датчики фиксируются с постоянным шагом (0,2...1м), не превышающим минимальную длину измерительных волн и образуют измерительный луч. Как показано в раздел 2.3 связь между скоростями поверхностных и изгибных волн и отношение $\frac{\lambda}{H}$ выражается по следующему уравнению в случае $\mu = 0,25$:

$$V_R = (0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H}) V_n \quad (4.1)$$

Т.к. $V_R/V_n \geq 1$, из формулы (4.1) $\rightarrow 0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H} \geq 1$. Тогда при использовании волн с длиной $\lambda \geq \lambda_{\min} = 1,4H$ уже можно рассматривать распространение из-

гибных волн в конструкциях и правильно подобрать шаг расстановки измерительных датчиков, даже если не известны ожидаемые акустические характеристики.

При известных ожидаемых акустических характеристиках применение формулы 4.1 дает возможность точно определить шаг расстановки датчиков. Уравнение 4.1 можно представить в следующем виде:

$$V_R = (0,63 + 0,26 \frac{V_{и}}{f.H}) V_{и} \quad (4.2)$$

Подставив известные значения (V_R , $f_{\max}$, H) в уравнение (4.2) и, решив его, получаем результат для максимальной скорости изгибной волны $V_{и}^{\max}$. Тогда минимальная длина распространения волны определяется по формуле:

$$\lambda_{\min} = \frac{V_{и}^{\max}}{f_{\max}} \quad (4.3)$$

В случае, если при решении уравнения (4.2) полученное значение максимальной скорости изгибной волны $V_{и}^{\max}$ превышает V_R , принимают значение $V_{и}^{\max}$ равным V_R и подставляют его в формулу (4.3) для определения $\lambda_{\min}$. Отсюда появляется возможность определить шаг расстановки акселерометров $a \leq \lambda_{\min}$.

Тип применяемых акселерометров выбирался в зависимости от частотного диапазона измеряемых волн. Так при измерении Рэлеевских и изгибных волн (частотный диапазон, обычно от 2-3 кГц до 100-400 Гц в зависимости от свойства и размеров конструкции). При частотах колебаний меньше 400 Гц использовались акселерометры А1613 или А1633, а при частотах ниже 100-150 Гц могли использоваться также акселерометры КВ-12. Сигнал записывается, когда датчик управления обнаруживает сигнал с определенным уровнем амплитуды.

4.2. Определение скоростей распространения упругих волн в плоскостных каменных конструкциях существующего здания

Согласно раздела 3.1 при испытании методом с использованием изгибных волн для определения скоростей распространения упругих волн в плоскостных каменных конструкциях необходимо предварительно построить математический модель распространения изгибных волн в упругой среде. При этом для кирпичной кладки при $\mu = 0,25$ получаем дисперсионную кривую (рис. 4.4), как это следует из уравнения (2.13) и табл. 4.1:

Таблица 4.1 - Точки координат дисперсионной кривой

V_w/V_R	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
H/λ	0,064	0,099	0,139	0,186	0,245	0,326	0,448

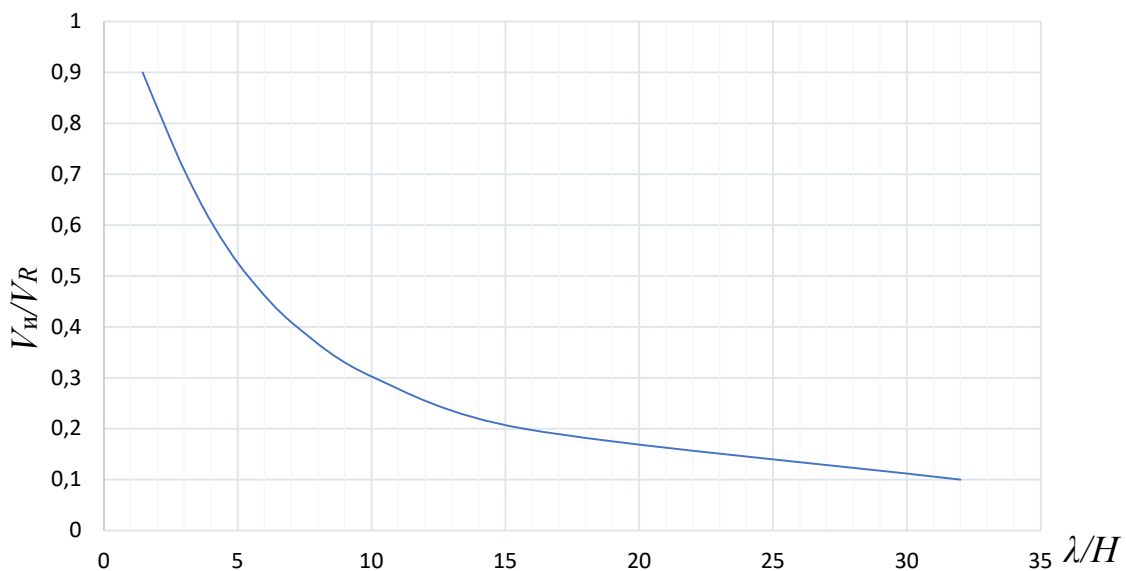


Рисунок 4.4. Зависимость V_w/V_R от отношения λ/H при $\mu = 0,25$

В соответствии с разделом 4.1 при использовании $\lambda \geq 1,4H$ можно использовать изгибные волны. Схема проведения испытания принимается так, как показана

но на рис. 4.2. Ударник представляет собой деревянный брус длиной 1,5 м и сечением около 100 см². Акселерометры расставляются в линию с постоянным шагом 0,5 м $\lambda_{\min} = 1,4 \times 0,53$ м (образуют измерительный луч), а точки приложения нагрузки выбираются в створе измерительного луча в его начале и конце. Определение акустических характеристик кирпичной кладки стен выполнялось в соответствии со схемой расположения измерительных створов (лучи 1–3), приведенной на рис. 4.5, для здания по адресу: Санкт-Петербург, Уткин проспект, дом 46.

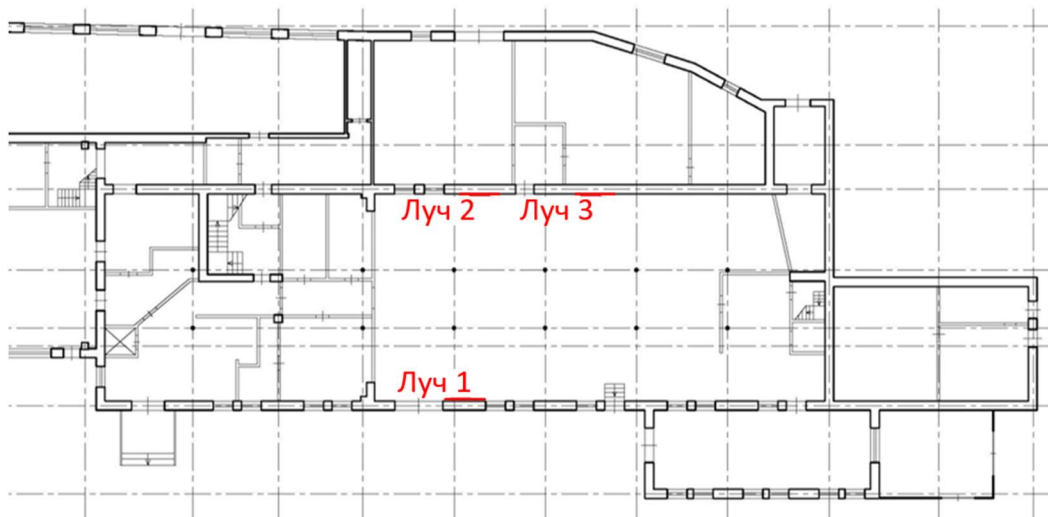


Рисунок 4.5. Обследуемое здание и схема зон инструментального обследования

Обработка результатов измерений выполнялась следующим образом. Исходные реализации волновых процессов (рис. 4.6), полученные при прямом и об-

ратном направлениях распространения волны (при ударах в ПУ1 и ПУ2, см. рис. 4.2), разделяются при обработке на монохроматические пучки с помощью группы полосовых фильтров, полосы пропускания которых расположены на частотной оси с шагом 0,5 октавы и шириной полосы пропускания 0,5 октавы [7–8]. По каждому выделенному пучку монохроматических волн определяют время распространения волны между точками измерения (рис. 4.7).

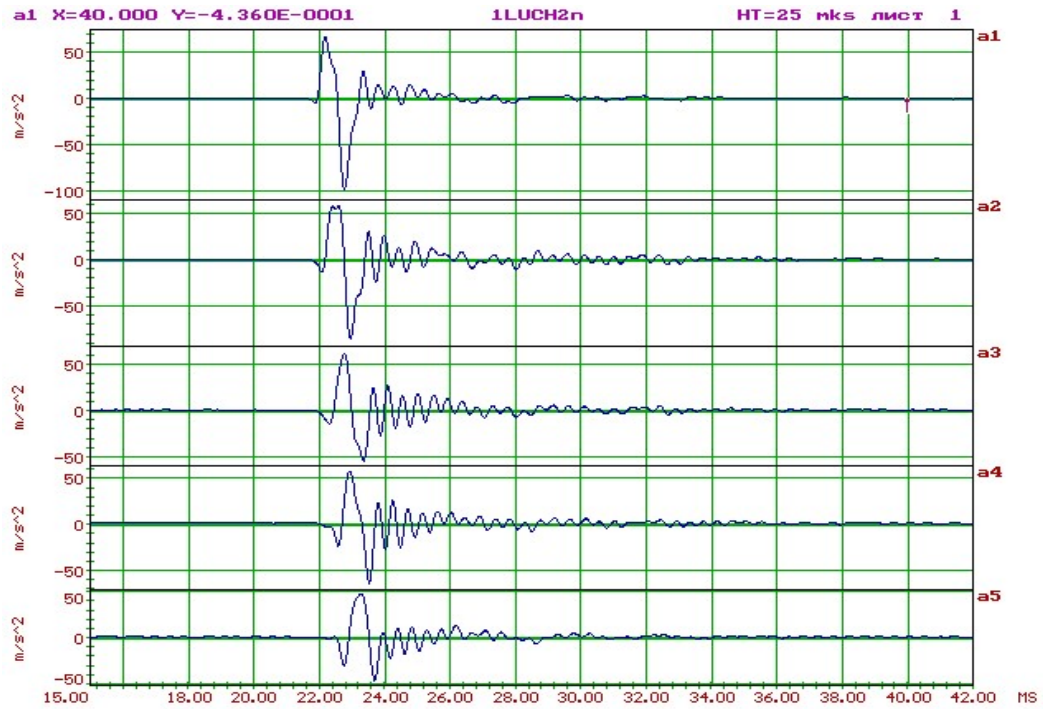


Рисунок 4.6. Пример записи исходных реализаций

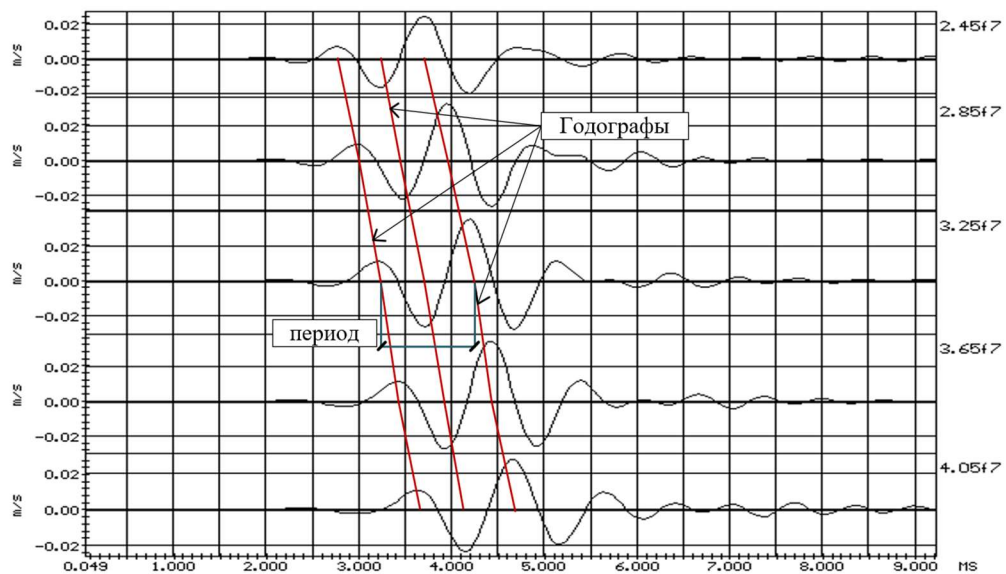


Рисунок 4.7. Пример выделенного пучка монохроматической волны

Фазовая скорость распространения волны V и длина волны λ определяются по результатам времени распространения монохроматического пучка волны между точками измерения:

$$V = L / t_{\text{п}}, \text{ м/с} \quad (4.4)$$

$$\lambda = TV, \text{ м} \quad (4.5)$$

где L — расстояние между точками измерения, м; $t_{\text{п}}$ — время пробега этого расстояния поверхностной волной, с; T — период колебаний в пучке монохроматической волны, с.

При рассмотрении прямых и обратных направлений распространений изгибных волн исходные реализации разделяются на монохроматические пучки с помощью группы полосовых фильтров. И по отсчетам времени распространения монохроматического пучка волны между каждыми точками определяется фазовая скорость распространения волны $V_{\text{и}}$ и длина волны λ . Дисперсионные кривые изгибных волн в стенах показаны на рис. 4.8, а результаты оценок скоростей распространения упругих волн в кирпичной кладке после обработки данных приведены в табл. 4.2.

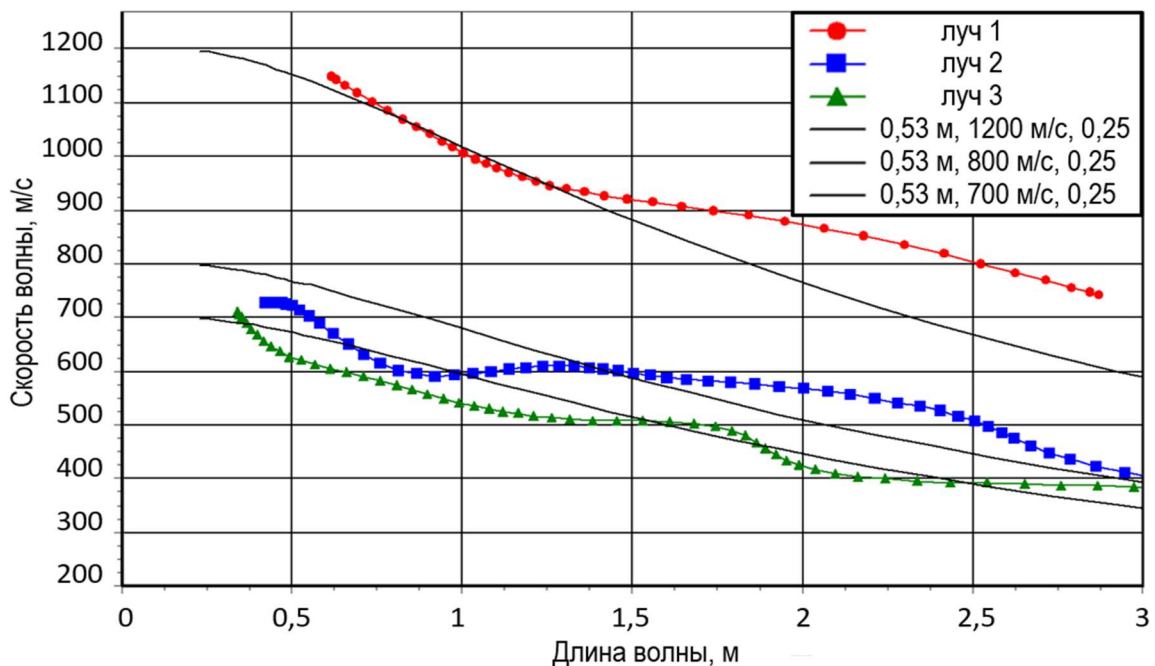


Рисунок 4.8. Дисперсионные кривые изгибных волн в кладке (для объекта по адресу: Санкт-Петербург, Уткин проспект, дом 4б)

Результаты обработки волновых процессов реакции конструкции на ударное импульсное воздействие используются при определении скоростей распространения упругих волн путем сравнения дисперсионных кривых изгибных волн, полученных по экспериментальным и расчетным теоретическим реакциям на ударное импульсное воздействие. Параметры акустической модели строительной конструкции подбираются методом итераций и с учетом известных данных до достижения наилучшего совпадения теоретической и экспериментальной дисперсионных кривых. Такой алгоритм позволяет определить скоростей распространения упругих волн в плоскостных каменных конструкциях с минимальной погрешностью.

Таблица 4.2 - Оценка скоростей распространения упругих волн в кладке

Обследуемые здания	Диспер. кривые	V_R , м/с	$\bar{V}_R$, м/с	V_P , м/с	$\bar{V}_P$, м/с	Погреш- ность, %
Санкт-Петербург, Уткин проспект, дом 46	Луч 1	1200	1323	2256	2487	9,3
	Луч 2	800	857	1504	1611	6,7
	Луч 3	700	713	1316	1340	1,8

Аналогично проведены экспериментальные исследования распространения изгибных волн в кладке стен толщиной 1 м для исторического объекта Усадьба Вяземских — Долгоруковых по адресу: Москва, Малый Знаменский переулок, дом 3/5. В данном здании известны ожидаемые акустические характеристики $V_R \approx 1100 - 1300$ м/с и максимальная частота возбуждаемых волн около 2500 Гц. Подставляя эти значения в уравнение (4.2) получаем результат $V_{и}^{max} \approx 1400 - 1600$ м/с $> V_R$. При этом принимаем $V_{и}^{max} = V_R$ и поставим его формулу (4.3). Таким образом, $\lambda_{min} \approx 0,44 - 0,52$ и шаг расстановки принят равным 0,5 м.

Принцип проведения импульсного возбуждения, измерения фазовых скоростей распространения изгибных волн и последующей обработки данных для построения дисперсионных кривых в зависимости от длин волн такой же, как на

здании по Уткиному проспекту. При этом схема расположения лучей для оценки упругих волн в кладке показана на рисунке 4.9. В этом случае два измерительных луча находятся на одной стене. Второй луч находится на 5 рядов выше луча первого. Дисперсионные кривые изгибных волн и теоретические линии (сплошные черные) представлены на рисунке 4.10. С этими данными после расчета представляются результаты оценки скоростей распространения упругих волн в кладке, которые показаны в таблице 4.3.

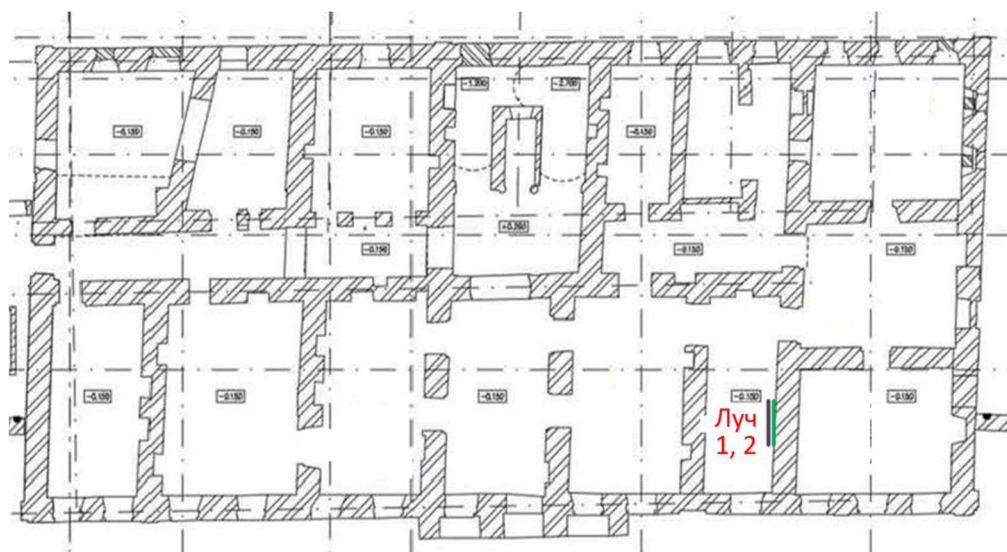
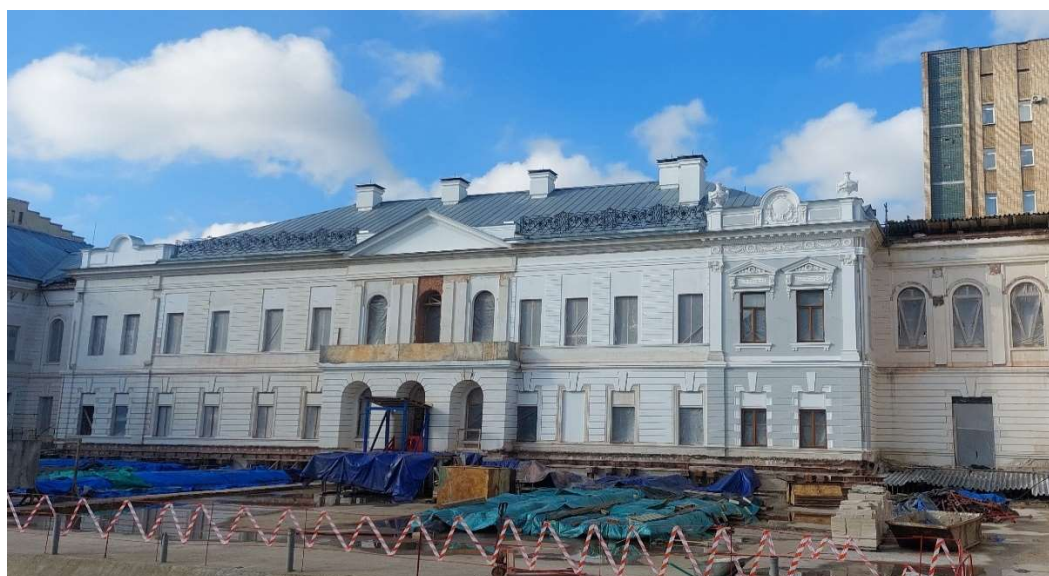


Рисунок 4.9. Обследуемый объект и схема расположения лучей при оценке акустических характеристик кладки

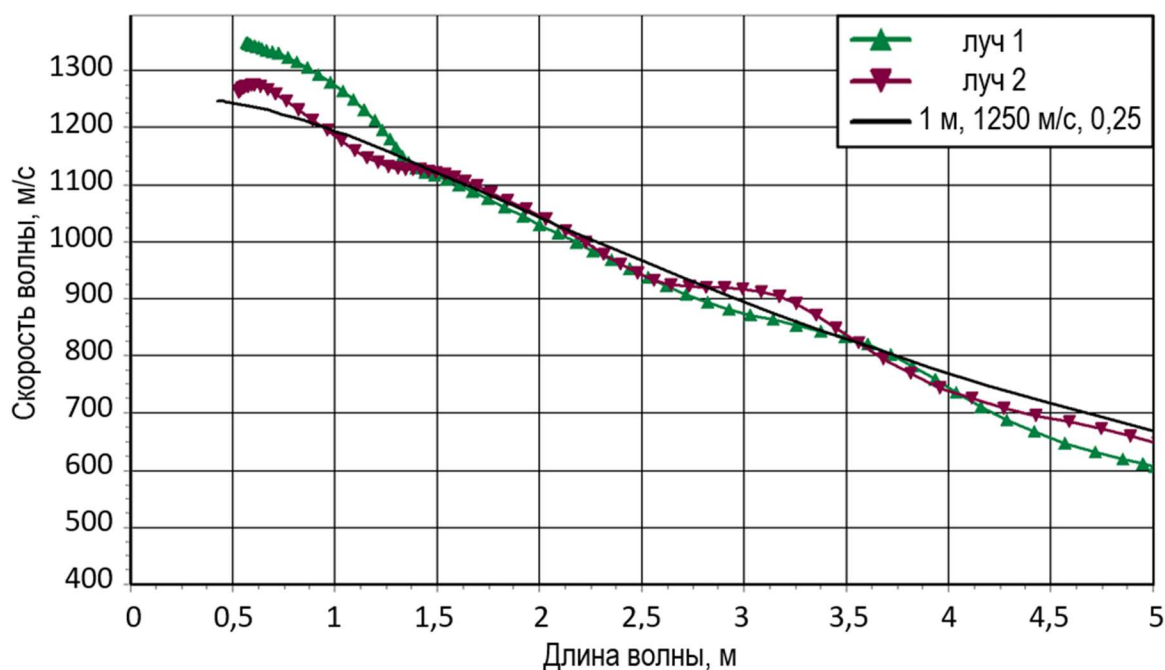


Рисунок 4.10. Дисперсионные кривые изгибных волн в кладке (для объекта по адресу: Москва, Малый Знаменский переулок, дом 3/5)

Таблица 4.3 - Оценка скоростей распространения упругих волн в кладке

Обследуемые здания	Диспер. кривые	V_R , м/с	$\bar{V}_R$, м/с	V_P , м/с	$\bar{V}_P$, м/с	Погрешность, %
Москва, Малый Знаменский переулок, дом 3/5	Луч 1	1250	1228	2350	2308	1,7
	Луч 2	1250	1242	2350	2335	0,6

По результатам оценки скорости распространения волн в кирпичных стенах у двух обследуемых зданий можно сделать следующие выводы:

- существует удовлетворительное совпадение между теоретической моделью дисперсионной кривой и экспериментальными результатами;
- результаты сравнительного анализа данных в таблицах 4.2 и 4.3 с погрешностями менее 10 % показывают возможность использования разработанного метода при оценке скоростей распространения упругих волн в плоскостных каменных конструкциях;
- полученные результаты подтверждают возможности эффективной диагностики строительных конструкций предложенным методом.

4.3. Оценка прочности кирпичных кладок на реальном объекте

4.3.1 Определение прочности кирпичей и раствора кладки

Обследуемый объект находится по адресу: Ленинградская область, Выборгский район, улица Смолячковская, дом 43. Для определения прочности кирпичных кладок толщиной 0,25 м был произведен отбор образцов кирпичей и раствора. При этом отбор образцов для определения прочности кирпичной кладки осуществлялся в соответствии с требованиями ГОСТ Р 53778 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» [63], ТСН 50-302-2004 «Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге» [64], а подготовка к лабораторным испытаниям по ГОСТ 8462-85 «Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе» [66].

В соответствии со стандартной процедурой [66] для приготовления раствора образцов необходимо использовать равный вес цемента марки 400 и песка, просеянного через сито с числом ячеек 1,25 ($V/C = 0,40-0,42$). Половинки кирпичей полностью погружаются в воду на одну минуту. После этого на горизонтально установленную плиту кладут лист бумаги со слоем раствора толщиной не более 5 мм. На раствор укладывается первая половинка кирпича, затем еще один слой раствора и вторая его половинка. Излишки раствора удаляются, а края бумаги загибаются за края образца. Образец выдерживается в таком положении в течение 30 минут. Затем образец поворачивают так, чтобы оставшаяся опорная поверхность также была выровнена вышеупомянутым способом. Максимальное отклонение от параллельности выровненных опорных поверхностей образца, определяемое максимальной разницей между любыми двумя его высотами, не должно превышать 2 мм. Образец выдерживается в помещении, температура в котором

поддерживается на уровне $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$, а относительная влажность – на уровне 60–80%, в течение трех дней.

Для испытания растворной смеси и изготовления образцов отбирают пробы по требованиям ГОСТ 5802—86 [67]. Пробы следует отбирать из рабочего ящика и из четырёх мест с различной глубины с объемом более 4 л. Прочность раствора на сжатие определяется на образцах-кубах размерами 70,7 x 70,7 x 70,7 мм в возрасте, установленном в стандарте. Для образцов из растворной смеси подвижностью более 5 см изготавливать в формах без поддона. Форму устанавливают на кирпич, покрытый газетной бумагой, смоченной водой. Размер бумаги должен быть таким, чтобы она закрывала боковые грани кирпича. Кирпичи перед употреблением должны быть притерты вручную один о другой для устранения резких неровностей. Применяют глиняный обыкновенный кирпич влажностью не более 2 % и водопоглощением 10 %—15 % по массе. Формы заполняют растворной смесью за один прием с некоторым избытком и уплотняют ее путем штыкования стальным стержнем 25 раз по concentрической окружности от центра к краям. В течение первых 3 суток образцы хранятся во влажном песке, а оставшееся до испытания время — в помещении при относительной влажности воздуха $(65 \pm 10) \%$. Испытательные образцы для определения прочности составляющих компонентов кладки представлены на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11. Образцы для испытаний

Во время испытания образцы располагаются на плите по центру, его геометрические оси и плиты совмещены, и подвергаются давлению со стороны верхней плиты пресса. Нагрузка, прикладываемая к образцу кирпича, должна увеличиваться непрерывно и равномерно со скоростью, которая обеспечивает разрушение образца в течение 20-60 секунд с момента начала испытания. Прочность образца на сжатие, МПа (кгс/см²), рассчитывается по следующей формуле.

$$R_k = \frac{P}{F} \quad (4.6)$$

В котором Р — максимальная нагрузка, возникающая при испытании образца, МН (кгс); F — площадь сечения образца, рассчитанная как среднее арифметическое площадей верхней и нижней его поверхностей, м² (см²).

Предел прочности на сжатие образцов в партии рассчитывается с точностью до 0,1 МПа как среднее арифметическое результатов испытаний определенного количества образцов.

При проведении испытания нагрузка на образец растворной смеси должна возрастать непрерывно с постоянной скоростью (0,6 ± 0,4) МПа [(6 ± 4) кгс/см²] в секунду до его разрушения. Предел прочности раствора на сжатие R вычисляют для каждого образца с погрешностью до 0,01 МПа (0,1 кгс/см²) по формуле:

$$R_p = \frac{P}{A} \quad (4.7)$$

где Р — разрушающая нагрузка, Н; А — рабочая площадь сечения образца, см². Рабочую площадь сечения образцов определяют по результатам измерения как среднеарифметическое значение площадей двух противоположных граней.

На рисунке 4.12 представлены кирпичные и растворные образцы до и после проведения испытаний. Полученные результаты после обработки представлены в таблице 4.4 для кирпича и в таблице 4.5 для раствора.



Рисунок 4.12. Экспериментальные образцы кирпича и растворного кубика до и после проведения испытания

Таблица 4.4 - Результаты определения прочности кирпича при сжатии по ГОСТ 8462-85

Номер образца	Площадь разрушения $A(\text{см}^2)$	Разрушающая сила P (кгс)	Прочность образца (кгс/см ²)	Прочность образца (МПа)	Среднее значение прочности
1	148,2	21144,3	143	14,0	20,3
2	150,1	34523,6	230	22,5	
3	150,7	34511,5	229	22,4	
4	150,6	29395,9	195	19,1	
5	150,1	31998,9	213	20,9	
6	150,6	28567,3	190	18,6	
7	151,2	37760,4	249	24,4	
8	149,4	25660,2	172	16,9	
9	150,0	24962,7	166	16,3	

Номер образца	Площадь разрушения $A(\text{см}^2)$	Разрушающая сила P (кгс)	Прочность образца (кгс/см ²)	Прочность образца (МПа)	Среднее значение прочности
10	147,0	40866,6	278	27,2	

Таблица 4.5 - Результаты определения прочности раствора при сжатии
по ГОСТ 5802-86

Номер образца	Площадь разрушения $A(\text{см}^2)$	Разрушающая сила P (кгс)	Прочность образца (кгс/см ²)	Прочность образца (МПа)	Среднее значение прочности
1	49,67	8023,0	161,5	15,83	17,85
2	49,70	10457,0	210,4	20,62	
3	49,77	10004,4	201,0	19,70	
4	49,77	9852,0	197,9	19,39	
5	49,77	8656,3	173,9	17,04	
6	49,56	7937,6	160,1	15,69	
7	49,98	9634,6	192,7	18,88	
8	49,18	8147,6	165,7	16,24	
9	49,98	10426,4	208,6	20,44	
10	49,07	9642,3	196,5	19,26	
11	49,28	7213,9	146,4	14,35	
12	49,63	8436,4	170,0	16,66	

Полученные результаты средних значений прочности образцов раствора и кирпича будут использоваться для определения прочностей кладки по методам с использованием формулы Онищика и Еврокода 6. При этом необходимо учесть, что значения прочности кирпича и раствора, определенные по ГОСТ 8462–85 [66] и 5802–86 [67], меньше, чем по EN 772-1:2000 [71] и 1015-11:1999 [72]. Для раствора это уменьшение может достигать 30%, а для сплошного керамического и силикатного кирпича – 10% и 14% соответственно [32]. Таким образом, для определения прочности кирпича и раствора по EN 772-1:2000; 1015-11:1999 необхо-

димо умножать результаты испытания по ГОСТ 8462–85; 5802–86 соответственно на коэффициенты $k_1 = 1,1$ и $k_2 = 1,3$.

4.3.2 Сравнительный анализ прочностных характеристик кирпичной кладки, определенных по разработанному методу с использованием изгибных волн и по существующим нормативам

Оценка прочностных характеристик кирпичной кладки методом с использованием изгибных волн выполнялась в соответствии со схемой инструментального обследования, приведенной на рисунке 4.2. По известным данным о средних значениях прочности кирпича и раствора определяют прочность кладки по формуле Онищика и Еврокода 6. С использованием таблицы 3.3 по корреляционным зависимостям между ожидаемой прочностью и скоростями продольной волны определяются предварительные акустические характеристики ($V_R \approx 1600$). Из них по формулам (4.2 и 4.3) - ожидаемые максимальную скорость изгибных волн $V_n^{\max}$ и минимальную длину измерительных волн $\lambda_{\min}$ соответственно равны 1350 м/с и 0,54 м. При этом датчики устанавливаются с шагом $30 \text{ см} < \lambda_{\min}$ для кирпичной кладки толщиной 25 см. Процесс проведения испытаний представлен на рисунке 4.13, результаты в виде дисперсионных кривых распространения изгибных волн в кладке в зависимости от их длин показаны на рисунке 4.14.



Рисунок 4.13. Проведение испытаний методом изгибных волн с измерительным комплексом и возбуждением с использованием тампера

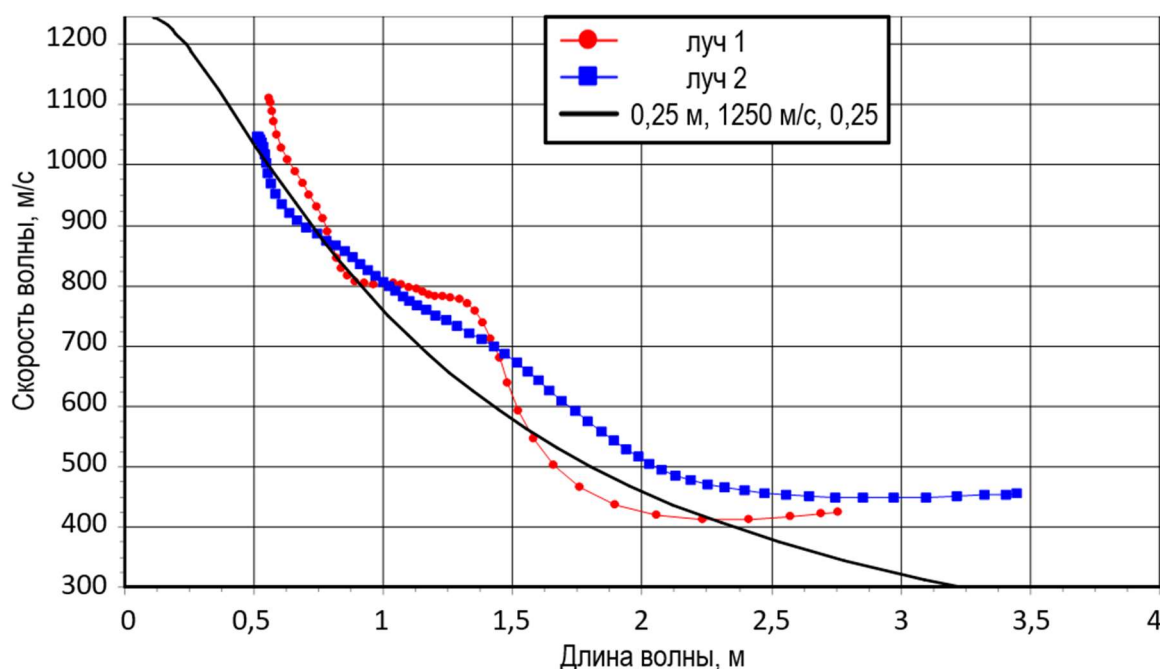


Рисунок 4.14. Результаты испытаний в виде дисперсионных кривых

При обработке данных, которые представлены на рисунке 4.14, рассчитываем средние скорости распространения Рэлееской волны по отсчетам в различных диапазонах измерительных длин волн. И таким образом определяем скорости распространения других упругих волны (скорости продольной и поперечной) а также прочность кладки по корреляционным зависимостям между ними. По полученным результатам испытания образцов проведен расчет для определения прочности кирпичной кладки по формуле Онищика и Еврокода 6. Результаты по

оценке прочности кирпичной кладки различными методиками (метод с использованием изгибных волн, формула Онищика, Еврокод 6) после обработки данных испытаний и проведения расчета представлены в табл. 4.6.

Таблица 4.6 - Оценка прочностных характеристик кладки стен

Обслед. объект	R_k , МПа	R_p , МПа	R , МПа	f_d , МПа	Диспер. кривые	V_R , м/с	R_p , МПа	λ , м	$\bar{V}_R$, м/с	$\bar{R}_p$, МПа	Сред. Значение МПа
Ленинград- ская область, Выборгский район, ул. Смолячков- ская, д. 43	20,3	17,85	3,06	3,77	Луч 1	1250	2,40	0,5-1	1319	2,49	2,48
								1-1,5	1460	2,68	
								1,5-2	1225	2,36	
								2-2,5	1236	2,38	
					Луч 2			0,5-1	1287	2,45	2,58
								1-1,5	1430	2,64	
								1,5-2	1447	2,66	
								2-2,5	1395	2,59	

Как и в большинстве результатов аналогичных исследований существенная разница между результатами оказалась при определении прочности кладки по формуле Онищика и Еврокода 6 [32, 37]. Однако при рассмотрении результатов измерений с использованием 5 датчиков в сочетании с использованием разных диапазонов частот получены разные значения с амплитудой разницы между ними и средним значением в пределах менее 10% при определении прочностей. Это означает, что стена имеет массив почти с постоянными по толщине конструкции прочностными характеристиками кладки. И при определении прочности кладки методом с использованием изгибных волн (по предложенной формуле 2.23) отмечается удовлетворительное совпадение с результатом расчета по формуле Онищика. Различия объясняются коэффициентом вариации прочности кирпича и раствора, отличиями ухода за кладкой, а также разницей условий проведения испытаний на объекте и в лаборатории.

Предлагаемый метод с применением изгибных волн позволяет решить проблему оценки механических характеристик кирпичных кладок по корреляционным зависимостям между скоростью распространения упругих волны и прочностью на измерительных створах большой протяженности. Проведен сравнительный анализ полученных при полевых исследованиях результатов с другими методиками (формула Л.И. Онищика, Eurocode 6) по определению прочности кирпичной кладки. Представленные практические результаты позволили оценить перспективы метода с использованием изгибных волн при обследовании здания и сооружений. В дальнейшем при проведении большего количества измерений кладки появится возможность определить корректировочный коэффициент к действующему нормативу для определения прочности кирпичных кладок. Кроме того, по предложенному методу также появляется возможность обнаружить наличие дефектов, повреждений, их размеры и ориентировочное положение по результатам анализа снижения скоростей распространения изгибных волн.

4.4. Контроль проектной толщины и оценка упругих характеристик плоскостных каменных конструкций существующих зданий

4.4.1. Контроль проектной толщины и оценка упругих характеристик бетонных плит

Одним из ограничений при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений, особенно для фундаментной плиты и стены, является то, что к ним есть доступ только с одной стороны. Это существенно затрудняет обследователям надежную оценку качества строительных материалов, а также проверку фактической толщины конструкции. Основываясь на данных по использованию сейсмоакустических волн в геологоразведке, можно аналогичным способом ис-

пользовать волны акустического диапазона частот при обследовании плит и стен. В рамках исследований распространения изгибных волн в плитных конструкциях была проведена опытная оценка характеристик конструкций для существующего объекта в Санкт-Петербурге. Конструкция представляла собой бетонный плитный фундамент с размерами 5×6 м и толщиной 27 см (см. рис. 4.15).

Как и в предыдущих экспериментах при неизвестных ожидаемых акустических характеристиках, поверхность бетонной плиты очищена и датчики установлены с шагом $30 \text{ см} < \lambda_{\min} = 1,4 \times 0,27 \text{ м}$ (см. рис. 4.15). После того, как был установлен и подключен к компьютеру многоканальный аналого-цифровой преобразователь провели измерения с использованием изгибных волн. Возбуждение изгибной волны осуществлялось с расстояния 1 м от двух крайних датчиков на поверхности плиты путем регулярных ударов деревянным брусом (тампером) длиной 1 м и площадью поперечного сечения 100 см^2 для повышения точности при построении дисперсионной кривой скорости распространения изгибной волны.

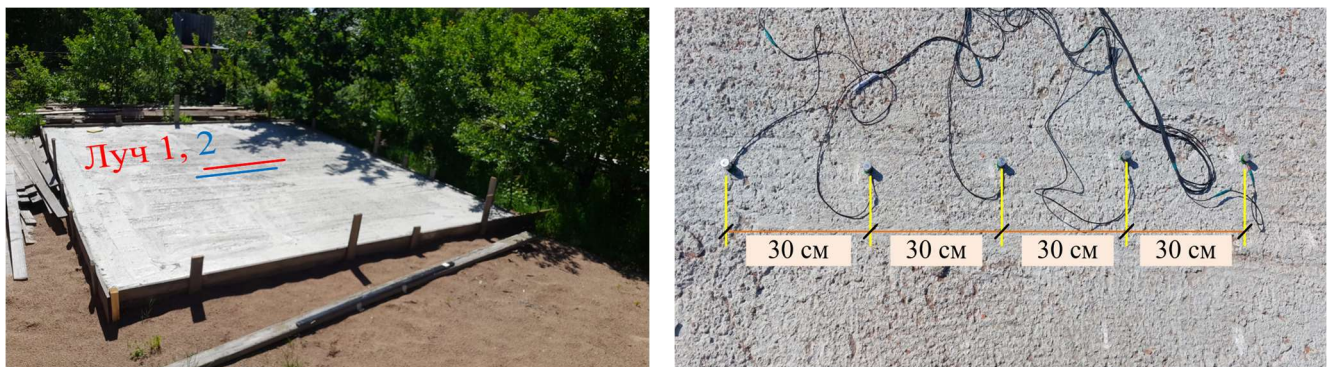


Рисунок 4.15. Фундаментная плита и датчики-акселерометры, установленные на ее поверхности

После анализа и обработки данных записей были получены результаты для времени и скорости распространения волны между точками измерения для соответствующей длины волны. Затем строится дисперсионная кривая скоростей распространения изгибных волн в зависимости от их длин (см. рис. 4.16). Также строится теоретическая дисперсионная кривая с известными данными по толщине

и скорости. Из этих результатов можно наблюдать, что существует сходство между экспериментальной скоростью волны и теоретической скоростью в диапазоне длин волн от 0,65 до 1,5 м. Впоследствии наблюдается явное снижение скорости распространения волны. Чтобы получить всестороннее представление, проводятся анализ и расчет для изучения и оценки толщины слоя материала и упругих характеристик бетонной фундаментной плиты по ее толщине.

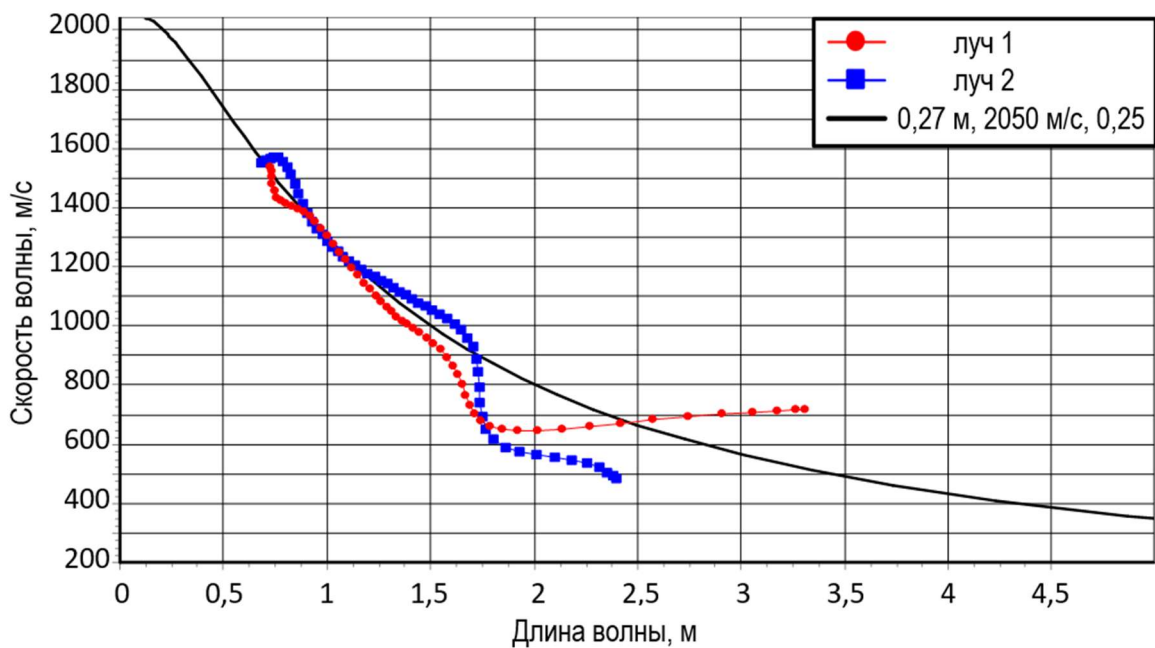


Рисунок 4.16. Дисперсионные кривые изгибных волн бетонной плиты фундамента объекта, расположенного по адресу: Ленинградская область, Выборгский район, ул. Смолячковская, д. 43

При сравнении экспериментальной дисперсионной кривой с теоретической модельной кривой выявляет сходство в диапазоне малых длин волн (от 0,65 до 1,5 м). В более высоком диапазоне длин расхождение экспериментальной и теоретической кривых более выражено, причем теоретическая кривая лежит выше экспериментальной. Однако средняя толщина слоя бетона, определенная методом изгибных волн, показывает незначительные расхождения по сравнению с фактическими данными, см. таблицу 4.7. Это подтверждает гипотезу о том, что

применение изгибных волн для определения толщины слоев строительных материалов является как осуществимым, так и эффективным.

Таблица 4.7 - Оценка проектной толщины и упругих характеристик
фундаментной бетонной плиты

Обслед. здание	Диспер. кривые	V_R , м/с	Факт. толщина, м	E_d , МПа	λ , м	Толщина, м	Сред. значение	Погреш- ность	$\bar{V}_R$, м/с	$\bar{E}_d$, МПа	По- греш- ность
Ленинград- ская об- ласть, Вы- боргский район, ул. Смолячков- ская, д. 43	Луч 1	2050	0,27	30993	0,5-1	0,282	0,249	7,8%	1890	26344	15%
					1-1,5	0,286					
					1,5-2	0,243					
					2-2,5	0,183					
	Луч 2				0,5-1	0,265	0,250	7,4%	1930	27471	11,4%
					1-1,5	0,267					
					1,5-2	0,226					
					2-2,5	0,240					

Кроме того, при оценке динамических модулей упругости также имеется разница в теоретической и экспериментальной кривой бетонной плиты с погрешностью 15 % для дисперсионной кривой №1 и 11,4 % для дисперсионной кривой №2. Это хорошо видно при наблюдении и сравнении экспериментальной кривой с теоретическим моделям. Разница объясняется тем, что под фундаментной бетонной плитой нет бетонной подготовки и слоя гидроизоляции, что приводит к потере воды. Это приводит к тому, что прочность нижнего слоя бетона значительно снижается по сравнению с верхним слоем.

4.4.2. Контроль проектной толщины и оценка упругих характеристик кирпичных стен

Метод изгибной волны используется для оценки упругих характеристик плоскостных каменных конструкций, в том числе толстостенных, при наличии доступа только к одной поверхности конструкции. Проверка проектной толщины и определение динамических модулей упругости кирпичной кладки стен существующего здания на Каменноостровском проспекте д. 61 выполнялись в соответствии со схемой инструментального обследования, приведенной на рисунке 4.2. А схема проведения испытаний с измерительным комплексом представлена на рисунке 4.17, результаты в виде дисперсионных кривых распространения изгибных волн в кладке в зависимости от их длин показаны на рисунке 4.18.



Рисунок 4.17. Схема проведения испытаний с измерительным комплексом

По результатам зондирования построены дисперсионные кривые и определены скорости распространения рэлеевской волны V_R . По скорости рэлеевской волны в материале стен, используя теорию упругости, легко найти значение скорости продольной волны V_P и определить упругие характеристики материалов

конструкций E_d . Результаты после обработки данных дисперсионных кривых, приведенные в табл. 4.8.

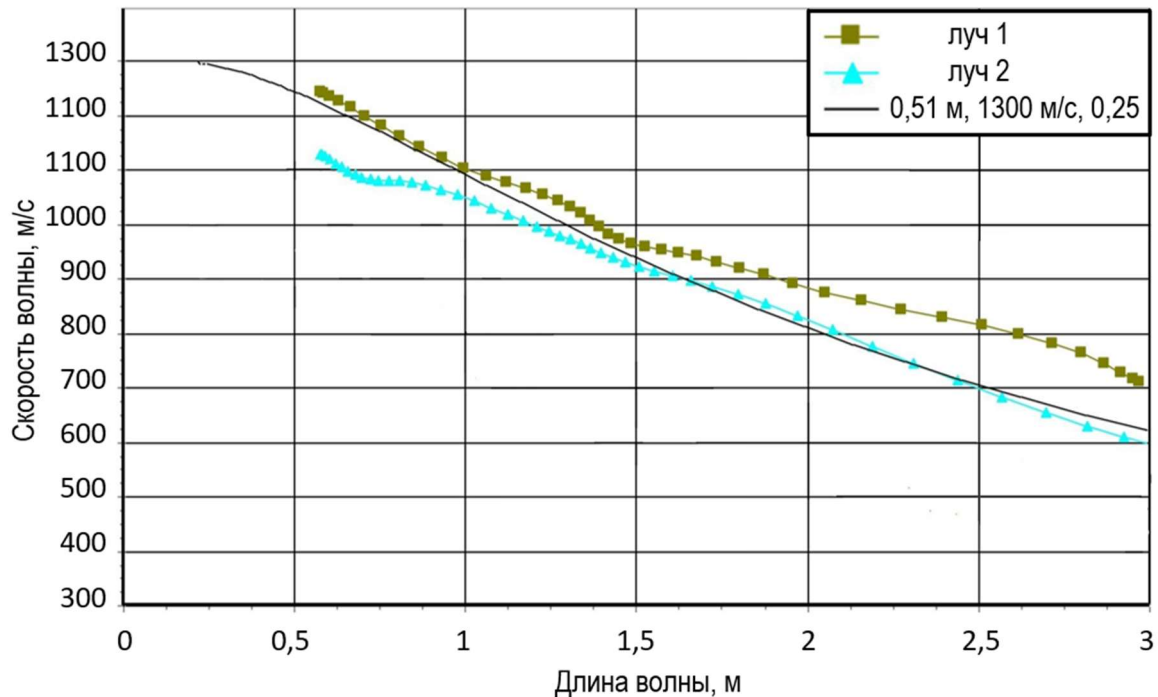


Рисунок 4.18. Дисперсионные кривые изгибных волн в кладке

Таблица 4.8 - Оценка проектной толщины и упругих характеристик
кладки стен здания

Обслед. здание	Диспер. кривые	V_R , м/с	Факт. толщина, м	E_d , МПа	λ , м	Толщина, м	Сред. Значение, м	Погреш- ность	$\bar{V}_R$, м/с	$\bar{E}_d$, МПа	По- греш- ность
Каменно- островский проспект д. 61	Луч 1	1300	0,51	8725	1-1,5	0,52	0,57	11,7%	1403	10162	16,5%
					1,5-2	0,57					
					2-2,5	0,63					
	Луч 2				1-1,5	0,47	0,50	2,0%	1284	8511	2,4%
					1,5-2	0,52					
					2-2,5	0,53					

Полученные результаты показали хорошее совпадение полученных данных с данными прямых испытаний осевой прочности кирпичной кладки. При определении толщины кладки у луча №1 существует погрешность (11,7%), различия ко-

торой обусловлены разницей между экспериментальными дисперсионными кривыми и теоретическими (сплошная черная линия в рис. 4.11). Фазовые скорости распространения изгибных волн в области коротких длин волн ближе к теоретическим значениям. А в других диапазонах эти значения превышают теоретические. Это значит, что внутренний слой кладки прочнее чем поверхностный и в таблице 4.6 показана разница динамических модулей упругости общей толщины и поверхностных слоев. Она составляет 16,5%. Это можно объяснить влиянием внешних климатических факторов (частные резкие перепады влажности и температурного режима, эрозия под воздействием неблагоприятных факторов, циклические процессы заморозки и оттаивания), которые снизили прочность наружного кирпично-строительного слоя и привели к уменьшению значения скорости распространения изгибных волн в диапазоне коротких длин волн.

4.5. Результаты испытаний кирпичных сводов

На основе теоретических и экспериментальных исследований по применению изгибных волн в плите и стене достигнуты положительные результаты. Однако для других типов конструкций (например, купол и свод) распространение акустических волн в них все еще имеет трудности, которые до настоящего времени не достаточно изучены. Экспериментальные исследования распространения акустических волн в сводах из кирпича проводились по адресу: Москва, Малый Знаменский переулок, дом 3/5. Участки проведения испытания и установки измерительного оборудования показано на рисунке 4.19. Результаты испытаний в виде зависимости скорости распространения волн от длины волны обобщены и представлены на рисунках 4.20 – 22.

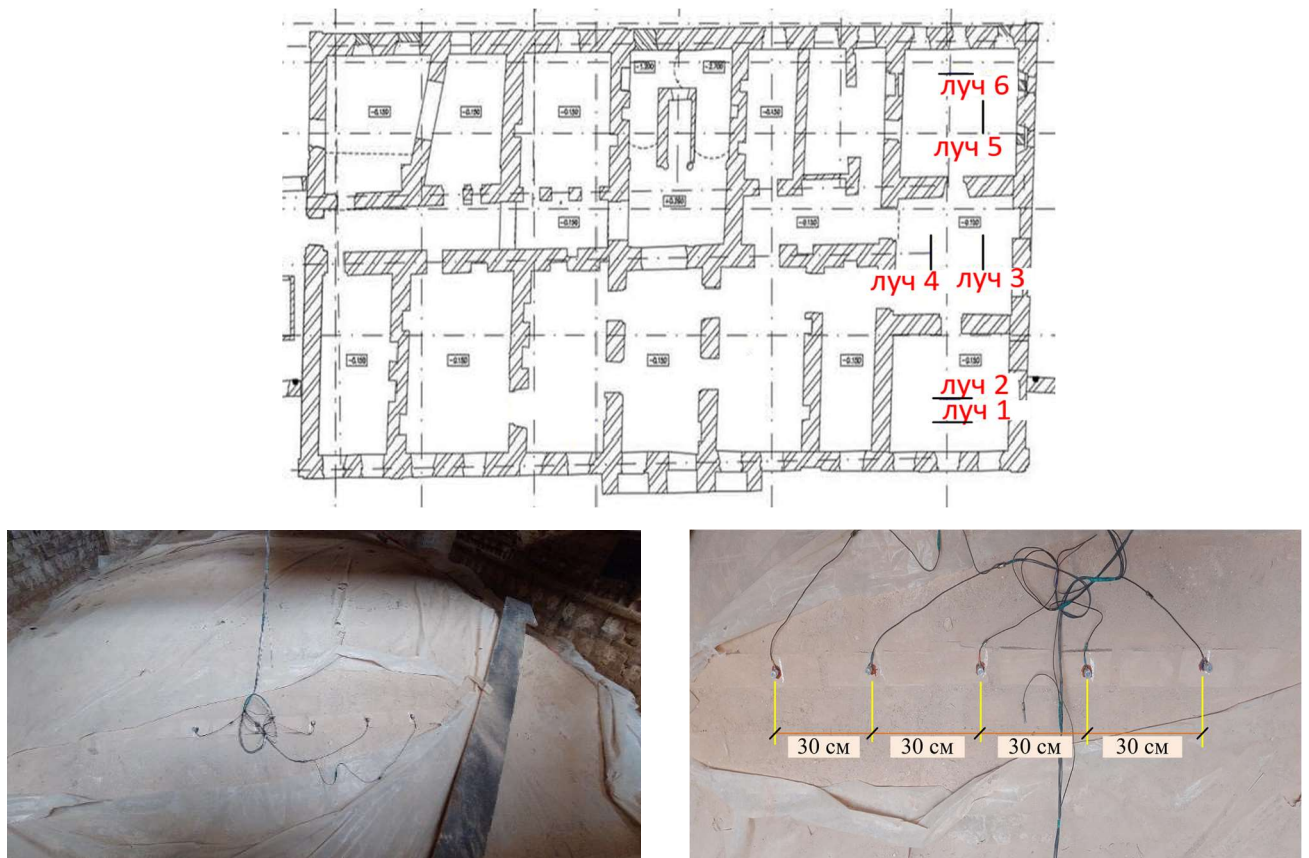


Рисунок 4.19. Участки проведения испытания и установки измерительного оборудования

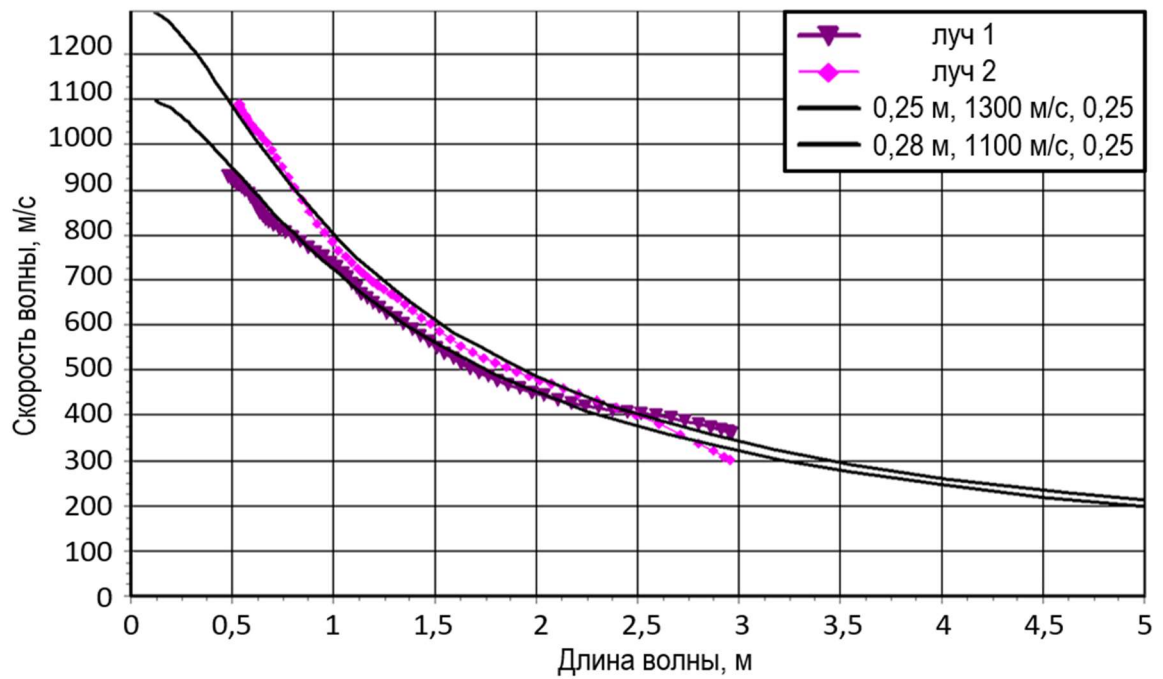


Рисунок 4.20. Дисперсионные кривые волн в своде (луч1, 2)

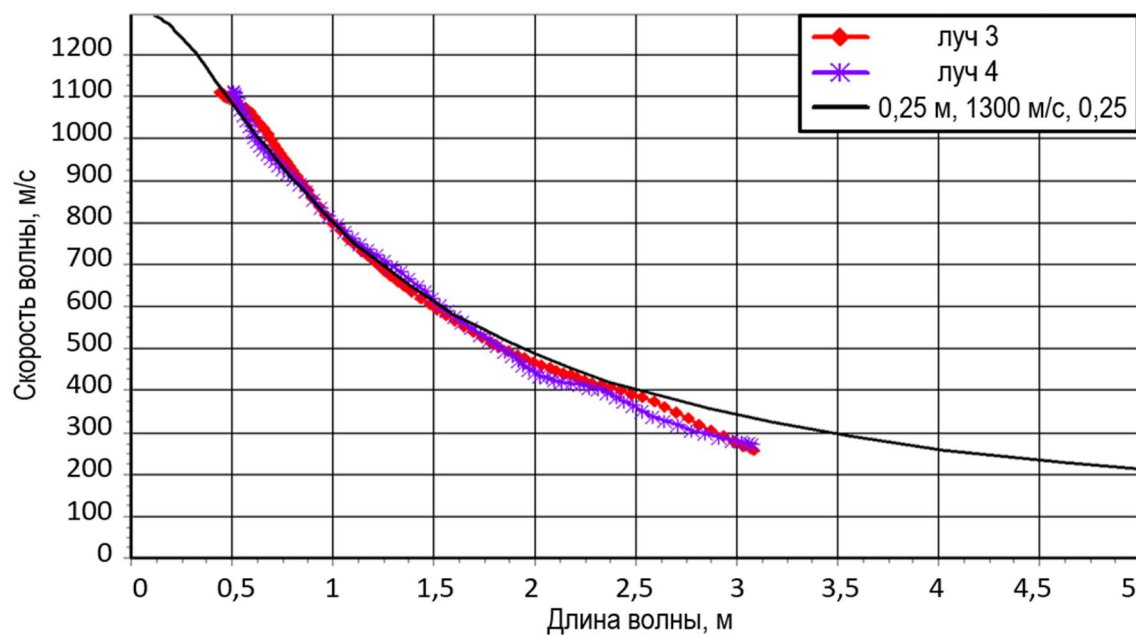


Рисунок 4.21. Дисперсионные кривые волн в своде (луч 3, 4)

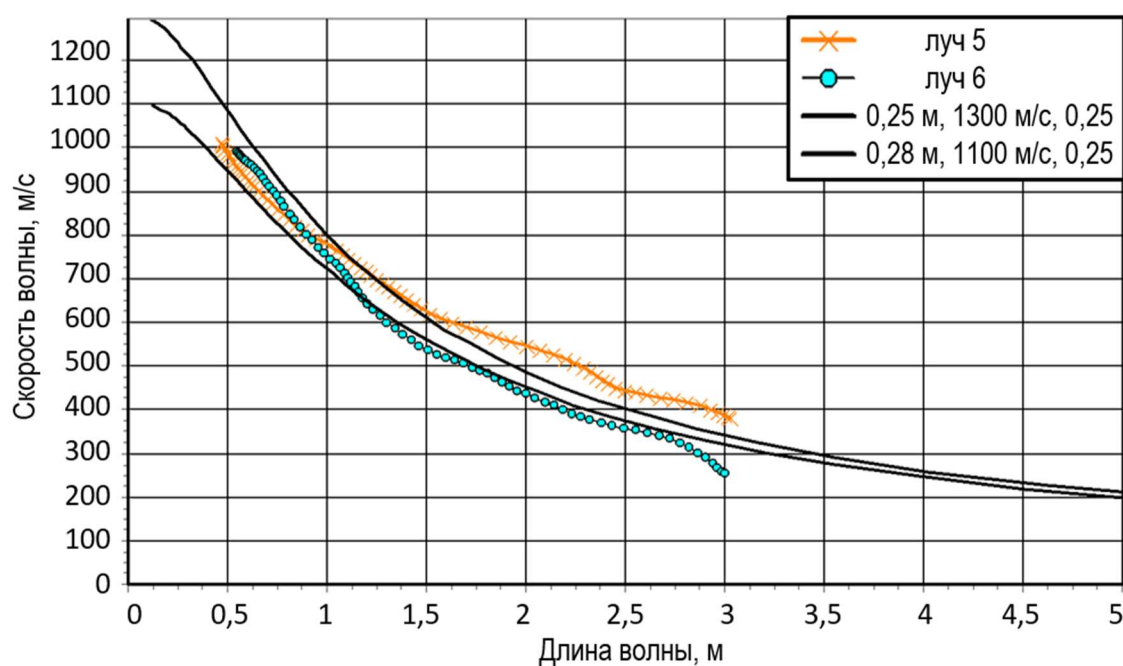


Рисунок 4.22. Дисперсионные кривые волн в своде (луч 5, 6)

На рисунке 4.20-22, помимо экспериментальных результатов, построены теоретические дисперсионные кривые. Здесь участки измерения, ограниченные двумя плоскостями, рассматриваются как плитные конструкции. Путем сравнения наблюдается сходство между теоретическими и экспериментальными данными.

Однако в теоретической модели толщина свода отличается от результатов экспериментальных измерений (см. рисунок 4.23). Сравнение этих результатов представлено в таблице 4.9.



Рисунок 4.23. Результаты измерения толщины кирпичной кладки в каждом своде

Таблица 4.9 - Оценка акустических характеристик и фактической толщины кирпичных сводов

Обслед. объект	Диспер. кривые	Толщина, м	V_R , м/с	Факт. толщина, м	$\bar{V}_R$, м/с	Погрешность (по толщине), %	$V_R/\bar{V}_R$
Москва, Малый Знаменский переулок, дом 3/5	луч 1	0,28	1100	0,3	1089	6,7	1,01
	луч 2	0,25	1300	0,3	1150	16,7	1,13
	луч 3	0,25	1300	0,3	1181	16,7	1,10
	луч 4	0,25	1300	0,3	1170	16,7	1,11
	луч 5	0,25	1300	0,3	1188	16,7	1,09
	луч 6	0,28	1100	0,3	1072	6,7	1,03

На участках, где поверхность имеет незначительную кривизну, результаты между теоретической моделью и фактическим результатом имеют

незначительную разницу (луч 1 и 6). Следовательно, на таких участках можно применять математические модели распространения изгибных волн в плоскостных конструкциях при оценке акустических и механических характеристик. На других участках конструкции свода, где имеет более высокий подъем, полученные результаты существенно отличаются (лучи 2 – 5). Но в любом случае при одинаковой толщине скорость распространения акустических волн в своде превышает скорости в плите и стене. И это повышение сильно зависит от кривизны свода. Поэтому в дальнейшем необходимы более подробные теоретические и экспериментальные исследования распространения акустических волн в таких конструкциях для уточнения результатов по оценке акустических и механических характеристик конструкций.

4.6. Перспективы дальнейшего исследования

С полученными результатами по оценке прочностных и упругих характеристик кирпичных стен и бетонных плит и другими данными о строительных конструкциях (габаритные размеры, нагрузки, назначение конструкции, ...) можно прийти к выводам о работоспособности здания и сооружения при эксплуатации. Исходя из этого, провести меры по усилению и реконструкции при необходимости.

Данные о механических характеристиках строительных материалов также играют важную роль при моделировании конструкции для расчета периода собственного колебания и динамических нагрузок, действующих на конструкцию. Кроме того, во многих исследованиях сейчас упоминается экспериментальное измерение периода собственного колебания здания для оценки уровня его повреждений. Сочетание двух методов способствует более конкретной оценке масштабов и места повреждения с целью своевременного принятия мер по усилению строительных конструкций.

Экспериментальные результаты по определению прочности кирпичных стен методом с использованием изгибных волн по сравнению с российскими и европейскими стандартами приносят относительно положительные результаты. В будущем при испытании большего количества кирпичных кладок возможно определить корректировочный коэффициент к действующему нормативу с целью оценки прочности кладки.

В дальнейшем также необходимо провести более обширные теоретические и экспериментальные исследования по распространению упругих волн в различных типах конструкций (например, куполообразные конструкции, своды и обделки тоннелей) для выяснения взаимосвязь между ними и свойствами материалов для разработки методов обследования и определения качества строительных материалов таких конструкций.

4.7. Выводы

Данные экспериментального исследования находятся в удовлетворительном соответствии с результатами теоретических дисперсионных моделей, и погрешность измерения скоростей упругих волн не превышает 10 % при использовании предложенной формулы для определения скоростей распространения рэлеевской и продольной волны.

Экспериментально подтверждена способность разработанной методики для определения фактических прочностных характеристик кирпичных кладок по корреляционным зависимостям между скоростью распространения упругих волн и прочностью, которые в качестве исходных данных пользуются для проектирования усиления или проведения реконструкции.

При сравнении с традиционным нормативным методом для оценки прочности кирпичной кладки существующего объекта, применение метода изгибных волн показано удовлетворительное совпадение. При этом возможность опреде-

лить корректировочный коэффициент к действующему нормативу при проведении испытаний большего количества кирпичных кладки для оценки их прочностных характеристик.

Экспериментально доказано путем исследования распространения изгибных волн в разных диапазонах частот позволить решить задачи контроля проектной толщины и оценки упругих характеристик по толщине бетонной фундаментной плиты и кирпичной стены существующих зданий при доступе только с одной стороны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в диссертации разработки посвящены дальнейшему совершенствованию методов неразрушающего контроля материалов строительных конструкций зданий и сооружений. Предложено использование разработанных в геофизике методов, основанных на анализе изгибных волн Г. Лэмба, применительно к плоским строительным конструкциям из бетона или каменной кладки. В результате исследований:

1. Определены и проанализированы существующие методы, использующие для оценки механических характеристик строительных конструкций волны сейсмоакустического диапазона частот. Установлены границы их применимости.
2. Установлено влияние основных факторов (модуля упругости, коэффициента Пуассона, толщины конструкций) на скорость распространения изгибных волн. Предложена формула определения скорости рэлеевской волны.
3. Экспериментально подтверждено влияние длин изгибных волн Г. Лэмба на их скорости распространения. Определены оптимальные диапазоны длин измерительных волн для оценки состояния строительных материалов конструкций.
4. Получена теоретическая зависимость между скоростью изгибной волны и ее длиной, которую можно использовать для построения дисперсионных кривых и годографов. Эта зависимость была положена в основу создания теоретических моделей для контроля качества материалов плоскостных каменных конструкций, обнаружения дефектов и повреждений при решении обратных задач на реальных объектах.
5. Разработан метод изгибных волн для неразрушающего контроля плоскостных каменных конструкций, включающий в себя процедуру возбуждения, измерения и обработки изгибных волн. Предложена методика оценки механических характеристик строительных материалов по толщине плоскостных каменных конструкций.

6. Выполнен сравнительный анализ скоростей упругих волн в кирпичных кладках на натурных объектах по теоретическим моделям и экспериментальным результатам. Установлены расхождения менее 10% между результатами теоретических и экспериментальных оценок, что подтверждает возможность применения метода для оценки скоростей распространения упругих волн в конструкциях.

7. Проведено сравнения результатов определения прочности кирпичных кладок существующих зданий по предложенной методике и действующим нормативам (формула Л.И. Онищика, Еврокод 6). При определении прочности кладки предложенным методом получено удовлетворительное совпадение с результатом расчета по формуле Л.И. Онищика.

8. На основе анализа результатов проведения испытания для контроля проектных толщин и оценки механических характеристик плоскостных каменных конструкций существующих объектов установлено, что использование изгибных волн в обследовании плитных и стеновых конструкций дает возможность определить проектную толщину и механические характеристики строительных материалов по толщине конструкций при одностороннем доступе.

9. Экспериментально определены акустические характеристики в конструкциях кирпичных сводов и проведен сравнительный анализ проектной толщины свода и скоростей распространения изгибных волн в нем. Намечены перспективы дальнейшего исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мочко, А. Проверка качества бетона в существующих конструкциях. Технологии европейских стандартов / А. Мочко, М. Мочко, В. И. Андреев // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14, вып. 8. – С. 967–975.
2. Гринченко, В. Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В. Т. Гринченко, В. В. Мелешко. – Киев: Наукова думка, 1981. – 284 с.
3. Achenbach J. D. Wave propagation in elastic solids / J. D. Achenbach. – Amsterdam; London: North-Holland PubliCo, 1973. – 430 с.
4. Попов, К.Н. Физико–механические испытания строительных материалов: [учеб. для техн. уч–щ] / К. Н. Попов, И. К. Шмурнов. – Москва: Высшая школа, 1984. – 208 с.
5. Гурвич, И. И. Сейсморазведка. Справочник геофизика / И. И. Гурвич. – Москва: Недра, 1981. – 464 с.
6. Hashimoto K. Application of Impact-Echo Method to 3D SIBIE Procedure for Damage Detection in Concrete / K. Hashimoto, T. Shiotani, M. Ohtsu // Applied Sciences. – 2020. – 10(8):2729. <https://doi.org/10.3390/app10082729>.
7. Sawicki B. Development of impact-echo multitransducer device for automated concrete homogeneity assessment / B. Sawicki, T. Piotrowski, A. Garbacz // Materials. – 2021. - No. 14, ID 2144. <https://doi.org/10.3390/ma14092144>.
8. Гроздов, В.Т. Техническое обследование строительных конструкций, зданий и сооружений / В.Т. Гроздов. – Санкт–Петербург: «Центр качества строительства», 1998. – 127 с.
9. Рытов, С.М. Акустические свойства мелкослоистой среды / С.М. Рытов // Акустический журнал. – 1964. – Т.10, №1. – С. 16–18.
10. Онищик, Л. И. Прочность и устойчивость каменных конструкций / Л. И. Онищик. – М.–Л.: Главная редакция строительной литературы, 1937. – 292 с.
11. Петухов, В. Д. Особенности и виды механических, физических и комплексных неразрушающих методов определения прочности бетона и анализ их приме-

- нения / В. Д. Петухов, С. В. Рябчиков // Информационно–технологический вестник. – 2022. – № 1(31). – С. 189–201.
12. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах / Л. М. Бреховских. – 2–е изд. М.: Наука, 1973. – 343 с.
 13. Sansalone, M. Impact-echo: A method for flaw detection in concrete using transient stress waves. / M. Sansalone, N. J. Carino. – Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards, 1986. – 222 p.
 14. Hsiao C. Detecting flaws in concrete blocks using the impact-echo method / C. Hsiao, C. C. Cheng, T. Liou. // NDT E Int. – 2008. – 41 (2). – 98–107 pp. DOI:10.1016/j.ndteint.2007.08.008.
 15. Горшков, А. Г. Волны в сплошных средах: Учеб. пособ. для вузов / А. Г. Горшков, А. Л. Медведский, Л. Н. Рабинский, Д. В. Тарлаковский – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 472 с. – ISBN 5–9221–0338–5.
 16. Guadagnuolo M. Modulus of Elasticity and Compressive Strength of Tuff Masonry: Results of a Wide Set of Flat-Jack Tests / M. Guadagnuolo, M. Aurilio, A. Basile, G. Faella // Buildings. – 2020 – 10(5):84–. doi: 10.3390/BUILDINGS10050084
 17. Улыбин, А. В. О методах контроля прочности керамического кирпича при обследовании зданий и сооружений / А. В. Улыбин, С. В. Зубков // Инженерно–строительный журнал. – 2012. – № 3(29). – С. 29–34. – DOI 10.5862/MCE.29.3.
 18. Алешин, Н. Н. Электросейсмоакустические методы обследования зданий / Н. Н. Алешин. – М.: Стройиздат, 1982. – 156 с.
 19. Lee S. Imaging defects in concrete structures using accumulated SIBIE / S. Lee, T. Kamada, S. Uchida, D.G. Linzell // Constr. Build. Mater. – 2014. – 67. – 180–185 pp. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.018.
 20. Qu H. Multi-bandwidth wavelet transform of impact echo signals for delamination detection of thin concrete slabs / H. Qu, M. Li, G. Chen // J. Civ. Struct. Health Monit. – 2016. – 6 (4). – 649–664 pp. DOI:10.1007/s13349-016-0187-2.
 21. Зубков, С. В. Опыт определения деформационных характеристик кирпичной кладки методом плоских домкратов / С. В. Зубков, А. В. Улыбин // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения : Материалы VII меж-

дународной научно–практической конференции, Санкт–Петербург, 13–14 октября 2016 года. – Санкт–Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт–Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2017. – С. 145–152.

22. Зубков, С. В. Исследование механических свойств кирпичной кладки методом плоских домкратов / С. В. Зубков, А. В. Улыбин, С. Д. Федотов // Инженерно–строительный журнал. – 2015. – № 8(60). – С. 20–29. – DOI 10.5862/MCE.60.3.

23. Carino, N. J. A point source-point receiver, pulse-echo technique for flaw detection in concrete / N. J. Carino, M. J. Sansalone, N. N. Hsu // ACI Journal. – 1986. – 83(2). 199–208 pp. DOI: 10.14359/10414.

24. Капустин, В. В. Применение георадарных технологий при обследовании подводных конструкций гидротехнических сооружений / В. В. Капустин, М. П. Широбоков // Геотехника. – 2021. – Т. 13, № 3. – С. 54–65. – DOI 10.25296/2221-5514-2021-13-3-54-65.

25. Nazarian, S. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems / S. Nazarian, K.H. Stokoe & W.R. Hudson // Transportation Research Record. – 1983. – pp. 38–45 pp.

26. Джонс, Р. Неразрушающие методы испытаний бетонов / Р. Джонс, И. Фэкзоару. пер. с рум. В. М. Маслбойщикова. – М.: Стройиздат, 1974. – 296 с.

27. Улыбин, А. В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений / А. В. Улыбин // Инженерно–строительный журнал. – 2011. – № 4(22). – С. 10–15.

28. Улыбин, А. В. Применение ультразвукового метода для оценки зоны повреждения железобетона после пожара / А. В. Улыбин, С. Д. Федотов // Инженерно–строительный журнал. – 2009. – № 7(9). – С. 38–40.

29. Фан, Ч. Д. Метод определения жесткостных характеристик строительных конструкций с использованием изгибных волн / Ч. Д. Фан, Д. А. Савин // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – № 3 (92). – С. 28–34.

30. Viktorov, I. Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications / I. Viktorov. – Springer Science+Business Media: New York, NY, USA, 1967. – 154 p.

31. Song K.I. Bonding state evaluation of tunnel shotcrete applied onto hard rocks using the impact-echo method / K.I. Song, G.C. Cho // *NDT E Int.* – 2009. – 42. – pp. 487–500.
32. Марчюкайтис, Г. В. Оценка прочности и деформативности каменной кладки при сжатии согласно СНиП II–22–81 и Eurocode 6 / Г. В. Марчюкайтис, Б. Б. Йонайтис, Ю. С. Валивонис, И. Я. Гнип // *Строительные материалы.* – 2004. – № 11. – С. 48–49.
33. Несветаев, Г. В. Особенности неразрушающего контроля прочности бетона эксплуатируемых железобетонных конструкций / Г. В. Несветаев, А. В. Коллеганов, Н. А. Коллеганов // *Интернет-журнал Науковедение.* – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 100.
34. Фан, Ч. Д. Определение прочности каменных конструкций методом с использованием скоростей изгибных акустических волн / Ч. Д. Фан // *Вестник гражданских инженеров.* – 2022. – № 6(95). – С. 21–29. – DOI 10.23968/1999–5571–2022–19–6–21–29.
35. Zhang J. K. Concrete Condition Assessment Using Impact-Echo Method and Extreme Learning Machines / J. K. Zhang, W. Yan, D. M. Cui // *Sensors.* – 2016. – 16(4):447. <https://doi.org/10.3390/s16040447>.
36. Ненашев, В. С. Опыт применения неразрушающих методов при оценке прочности материалов кирпичной кладки XVI века / В. С. Ненашев, Н. И. Снегирев // *Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения : Материалы VII международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13–14 октября 2016 года.* – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2017. – С. 194–201.
37. Desyatova, P. Graphic comparison of masonry compressive strength formulas / P. Desyatova, D. Dronov, V. Nenashev // *AlfaBuild.* – 2019. – No. 5(12). – pp. 85–97 – DOI 10.34910/ALF.12.9.

38. Аронов, Р.И. Испытания сооружений [Текст] / Р.И. Аронов. – М.: Высшая школа, 1974. – 187 с.
39. Gregory L. Hebel. Site characterization in Shelby County, Tennessee using advanced surface methods / Gregory L. Hebel, Dr. Glenn J. Rix. // Georgia Institute of Technology, 2001. – 164 p.
40. Антипов, В. В. Современные неразрушающие методы изучения инженерно–геологического разреза / В. В. Антипов, В. Г. Оффрихтер // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 37–49. – DOI 10.15593/2224–9826/2016.2.04.
41. Carpinteri, A. Historical brick–masonry subjected to double flat–jack test: Acoustic emissions and scale effects on cracking density / A. Carpinteri, S. Invernizzi and G. Lacidogna // Construction and Building Materials. – 2009. – Vol. 23. – pp. 2813–2820.
42. Moczko, A. T. CAPO–TEST to Estimate Concrete Strength in Bridges / A. T. Moczko, N. J. Carino, and C. G. Petersen // ACI Materials Journal. – 2016. – 113(6). DOI:10.14359/51689242.
43. Гарифулин, Д.М. Применение инструментальных обследований для оценки фактического состояния строительных конструкций зданий атомных электростанций / Д.М. Гарифулин, Н.А. Есенина, И.В. Ситников // Сейсмостойкое строительство. – 1999. – № 6. – С. 15–18.
44. Chaudhary M. T. A. Effectiveness of Impact Echo Testing in Detecting Flaws in Prestressed Concrete Slabs / M. T. A. Chaudhary // Construct. Build. Mater. – 2013. – 47. – 753–759.
45. Ilyashenko, A. V. Theoretical Aspects of Applying Lamb Waves in Nondestructive Testing of Anisotropic Media / A. V. Ilyashenko, S. V. Kuznetsov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2017. – Vol. 53, No. 4. – P. 243–259. – DOI 10.1134/S1061830917040039.

46. Šofer, Michal. Numerical solution of Rayleigh–Lamb frequency equation for real, imaginary and complex wavenumbers / Michal Šofer, Petr Ferfecki and Pavel Šofer // Matec web conf. 2018. Volume 157. DOI:10.1051/matecconf/201815708011.
47. Деркач, В. Н. Методы оценки прочности каменной кладки в отечественной и зарубежной практике обследования зданий и сооружений / В. Н. Деркач, Н. М. Жерносек // Вестник Белорусско–Российского университета. – 2010. – № 3. – С. 135–142.
48. Савин, С. Н. Использование упругих колебаний различных длин волн для оценки динамических параметров зданий и сооружений и прочности каменной кладки / С. Н. Савин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – № 4. – С. 43–54.
49. Lee, Y.H. The Simple Lamb Wave Analysis to Characterize Concrete Wide Beams by the Practical MASW Test / Y.H. Lee, T. Oh // Materials (Basel). – 2016 Jun 2. – 9(6):437. doi: 10.3390/ma9060437.
50. Lu, C. Detection and localization of closely distributed damages via lamb wave sparse reconstruction/ C. Lu, J. Hua, Z. Wang, and J. Lin // Vibroengineering PROCEEDIA. – 2017. – Vol. 14. – P. 115–119. doi: 10.21595/vp.2017.19222.
51. Абрамов, Д.С. Производственный контроль качества железобетонных изделий [Текст] / Д.С. Абрамов, В.Д. Лерман. – Л.: Стройиздат, 1978. – 160 с
52. Фан, Ч. Д. Применение метода с использованием изгибных волн для обследования плитных и стеновых конструкций / Ч. Д. Фан // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 12. – С. 41–53. – DOI 10.34031/2071–7318–2023–8–12–41–53.
53. Защук, И.В. Электроника и акустические методы испытания строительных материалов [Текст] / И.В. Защук. – М.: Высшая школа, 1968. – 247 с.
54. Давидюк, А. А. Анализ результатов обследования многослойных наружных стен многоэтажных каркасных зданий / А. А. Давидюк // Жилищное строительство. – 2010. – № 6. – С. 21–26.

55. Nobile, L. Micro-destructive flat-jack test for the diagnosis of historic masonry / L. Nobile, C. Gentilini, V. Bartolomeo, M. Bonagura // *Key Engineering Materials*. 2010. – Vol. 417–418. – Pp. 741–744.
56. Чуркин, А. А. Развитие методики анализа нормированного акустического отклика для оценки контакта «конструкция-грунт» / А. А. Чуркин, И. Д. Смирнов // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. – 2023. – № 3. – С. 32–47. – DOI 10.37153/2618-9283-2023-3-32-47.
57. Семенов, А. С. Использование разрушающих и неразрушающих методов контроля физико(механических характеристик материала строительных конструкций / А. С. Семенов // *Строительные материалы*. – 2010. – № 12. – С. 86–87.
58. Marazzani, J. Elastic Properties Estimation of Masonry Walls through the Propagation of Elastic Waves. An Experimental Investigation. / J. Marazzani, N. Cavalagli, V. Gusella // *Applied Sciences*. – 2021. – 11. – 9091. – DOI:10.3390/app11199091.
59. Баев, А. Р. Особенности распространения волн Лэмба в тонких двухслойных материалах / А. Р. Баев, П. П. Прохоренко // *Вестник БНТУ*. – 2008. – №4. – С. 52–55.
60. СП 15.13330.2020. Каменные и армокаменные конструкции. – Введ. 2021–07–01. – Москва : Минрегион, 2020. – 106 с.
61. ГОСТ 22690–2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. – Введ. 2016–04–01. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 23 с.
62. СТБ EN/1996–1–1–2008. Проектирование каменных конструкций. Ч. 1–1 : Общие правила для армированных и неармированных каменных конструкций. – Введ. 1.07.2009. – М.: Стройтехнорм, 2008. – 127 с.
63. ГОСТ Р 53778. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – Введ. 2011–01–01. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 96 с.
64. ТСН 50–302–2004. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт–Петербурге.– Введ. 2004–10–01. – Санкт–Петербург : Правительство Санкт–Петербурга, 2004. – 63 с.

65. ГОСТ Р 56542. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – Введ. 2020–11–01. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 12 с.
66. ГОСТ 8462–85. Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе. – Введ. 1985–07–01. – Москва : Издательство стандартов, 2001. – 7 с.
67. ГОСТ 5802—86. Растворы строительные. Методы испытаний. – Введ. 1986–07–01. – Москва : Стандартиформ, 2018. – 19 с.
68. ГОСТ 17623–87. Бетоны. Радиоизотопный метод определения плотности [Текст]. – Введ. 1988–01–01. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 12 с.
69. ГОСТ 17624–2021. Бетоны. Ультразвуковой метод определения, прочности [Текст]. – Введ. 2022–09–01. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 17 с.
70. ГОСТ 24332–88. Кирпич и камни силикатные. Ультразвуковой метод определения прочности при сжатии. – Введ. 1989–07–01. – Москва : Издательство стандартов, 1989. – 21 с.
71. EN 772–1:2000. Methods of test for masonry units — Part 1: Determination of compressive strength.
72. EN 1015–11:1999. Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.
73. Добромислов, А. Н. Диагностика повреждений зданий и инженерных сооружений / А. Н. Добромислов. – М.: МГСУ; АСВ, 2006. – 256 с.
74. Новикова, С. Аналіз результатів обстеження зовнішніх багатопарових стін з облицюванням цеглою/ С. Новикова // Будівельні матеріали та вироби. – 2018. – (5–6(99)). – С.106–108. <https://doi.org/10.48076/2413–9890.2018–99–14>
75. Савин, Д. А. Применение метода поверхностных волн для обследования конструкций с отражающими границами / Д. А. Савин, И. В. Ситников, Л. Д. Распопская // Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения : Материалы Всероссийской научно–технической конференции / Под общей редакцией В.И. Геры : Военно–космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2018. – С. 80–83.

76. СТО 14258110–005–2015. Бетоны. Определение прочности методом отрыва со скалыванием. – Введ. 2015–02–25. – М. : Издательство «Перо», 2015. – 32 с.
77. Чуркин, А. А. Геофизический комплекс экспресс-диагностики состояния фундаментных плит / А. А. Чуркин, И. Д. Смирнов, М. П. Широбоков // Фундаменты. – 2023. – № 3(13). – С. 43–47.
78. Снежков, Д. Ю. Анализ методик неразрушающих испытаний бетона конструкций по действующим государственным стандартам и нормам Евросоюза / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович, А. В. Вознищик // Наука и техника. – 2013. – № 2. – С. 33–39.
79. Ibadov, A. A. Investigation of the relationship between the Lamb waves phase velocity and the technical condition of housing and utilities pipelines / A. A. Ibadov, A. E. Kondrat'ev, D. A. Makueva and D. V. Sergeeva. // E3S Web of Conferences. – 2020. – 216, 01080.
80. Ситников, И.В. Применение метода поверхностных волн для обследования строительных конструкций зданий и сооружений / И.В. Ситников, А.Г. Жиленков, Л.И. Титова // Сейсмостойкое строительство. – 1996. – № 6. – С. 35–40.
81. Комар, А.Г. Испытания сборных железобетонных конструкций [Текст] / А.Г. Комар, Е.Н. Дубровин. – М.: Высшая школа, 1980. – С. 240 с.
82. Снежков, Д. Ю. Мониторинг железобетонных конструкций на основе неразрушающих испытаний бетона: методы контроля, критерии соответствия / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович, Л. В. Ким // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2015. – № 1(22). – С. 80–88.
83. Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий. М.: ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 1988. – 36 с.
84. Лифанов, Н.С. Метрология, средства и методы контроля качества в строительстве: Справочное пособие [Текст] / Н.С. Лифанов, Н.Г. Шерстюков Н. Г. – М.: Стройиздат, 1979. – 223 с.
85. Tavaf, V. Generalized Analytical Dispersion Equations for Guided Rayleigh–Lamb waves and Shear Horizontal (SH) waves in Corrugated Waveguides / V. Tavaf, S.

- Banerjee // International Journal of Solids and Structures. – 2020. – 202. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2020.05.026
86. Park, Choon B. Multichannel analysis of surface waves / Park, Choon B., Miller, Richard D., Xia, Jianghai // Geophysics. –1999. – 64 (3). – 800–808. – doi:10.1190/1.1444590
87. Крылов, Н.А. Испытание конструкций сооружений [Текст] / Н.А. Крылов, К.А. Глуховской. – Л.: Стройиздат, 1970. – 273 с.
88. Савин, С. Н. Оптимизация выбора диапазона длин изгибных волн для обследования конструкции плитного типа / С. Н. Савин, А. О. Хегай, Ч. Д. Фан, В. Ч. Ле // Вестник гражданских инженеров. – 2024. – № 3(104). – С. 44–50. – DOI 10.23968/1999–5571–2024–21–3–44–50.
89. Землянский А. А. Обследование и испытание зданий и сооружений / А. А. Землянский. – М.: АСВ, 2004. – 240 с.
90. Улыбин, А. В. Стандартная и альтернативная методики определения прочности кирпича при обследовании зданий и сооружений / А. В. Улыбин, С. В. Зубков, О. Ю. Сударь, Е. А. Лаптев // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 3(18). – С. 9–24.
91. Козачек В. Г. Обследование и испытание зданий и сооружений / Козачек В. Г., Нечаев Н. В., Нотенко С. Н., Римшин В. И., Ройтман А. Г. – М.: Высшая школа, 2004. – 447 с.
92. Крылов, Н.А. Радиотехнические методы контроля качества железобетона [Текст] / Н. А. Крылов, В. А. Калашников, А. М. Полищук ; Под общ. ред. д-ра техн. наук проф. Н. А. Крылова. – Ленинград ; Москва : Стройиздат. [Ленингр. отделение], 1966. – 379 с.
93. Yang, Y. Depth detection of surface-breaking cracks in concrete plates using fundamental lamb modes / Y. Yang, G. Cascante, M.A. Polak // NDT & E INTERNATIONAL. – 2009. – 42(6). – 501–512. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.02.009.
94. Kirlangiç, A.S. Assessment of concrete beams with irregular defects using surface waves / A.S. Kirlangiç, G. Cascante, M.A. Polak // ACI Materials Journal. – 2016. – 113(1). – 73–81. – DOI: 10.14359/51688070.

95. Краснощеков, Ю. В. Модель прочности бетона на отрыв со скалыванием / Ю. В. Краснощеков // Вестник Сибирского государственного автомобильно–дорожного университета. – 2021. – Т. 18, № 2(78). – С. 216–224. – DOI 10.26518/2071–7296–2021–18–2–216–224.
96. Cho, Y.S. Non–destructive testing of high strength concrete using spectral analysis of surface waves / Y.S. Cho // NDT & E INTERNATIONAL. – 2003. – 36(4). – 229–235. – [https://doi.org/10.1016/S0963–8695\(02\)00067–1](https://doi.org/10.1016/S0963–8695(02)00067–1)
97. Савин, С.Н. Оценка качества монолитных железобетонных конструкций/ С.Н. Савин, И.В. Ситников, И.Л. Данилов // Жилищное строительство. – 2009. – № 9. – С. 20–21.
98. Goueygou, M. Assessment of porosity of mortar using ultrasonic Rayleigh waves / M. Goueygou, Z. Lafhaj, F. Soltani // NDT & E INTERNATIONAL. – 2009. – 42(5). – 353–360. – <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.01.002>.
99. Ермолов, И.Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества [Текст] / И.Н. Ермолов, Ю.А. Останин. – М.: Высшая школа, 1988. – 368 с.
100. Sànchez–Salinero I. (1987). Analytical investigation of seismic methods used for engineering applications. PhD Diss. Un. of Texas at Austin.
101. Букин, А. В. Определение прочности бетона методами разрушающего и неразрушающего контроля / А. В. Букин, А. Н. Патраков // Вестник Пермского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2010. – № 1. – С. 89–94.
102. Ryden, N. Portable Seismic Acquisition System (PSAS) for pavement MASW / N. Ryden, P. Ulriksen, C. Park, R. Miller // Proc. of SAGEEP 2002. Las Vegas, USA. – 2002 February 10–14, CD–Rom. DOI: 10.4133/1.2927140.
103. Садович, М. А. Неразрушающие методы контроля прочности бетонных гидротехнических сооружений / М. А. Садович, Т. Ф. Шляхтина, А. М. Курицына, А. В. Шкулева // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2019. – Т. 1. – С. 141–146.
104. Xu, X. Comprehensive index condition assessment of structural concrete based on surface wave techniques / X. Xu, J. Lan, A. S. Kırlangıç, M. A. Polak // Advances in

Bridge Engineering. – 2023. – Volume 4, Article number: 29. <https://doi.org/10.1186/s43251-023-00108-y>.

105. Бочкарев, М. А. Сравнение разрушающего и неразрушающего метода контроля прочности бетона / М. А. Бочкарев // Поколение будущего: взгляд молодых ученых– 2020 : сборник научных статей 9-й Международной молодежной научной конференции, Курск, 12–13 ноября 2020 года. Том 4. – Курск: Юго–Западный государственный университет, 2020. – С. 220–221.

106. Леонович, С. Н. Исследование неравнопрочности бетона на объекте монолитного строительства комплексным неразрушающим методом контроля / С. Н. Леонович, Д. Ю. Снежков // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 8(608). – С. 108–115.

107. Добшиц, Л. М. Контроль прочности бетона конструкций, имеющих дефекты в структуре бетона / Л. М. Добшиц, А. В. Белов, А. Л. Клибанов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – № 4. – С. 28–33.

108. Liu, Z. Application and Challenges of Signal Processing Techniques for Lamb Waves Structural Integrity Evaluation: Part A-Lamb Waves Signals Emitting and Optimization Techniques. Structural Health Monitoring from Sensing to Processing / Z. Liu, H. Chen. InTech, 26 Sept. 2018. doi:10.5772/intechopen.78381.

109. Kee, S.H. Evaluation of Delamination in Concrete by IE Testing Using Multi-Channel Elastic Wave Data / S.H. Kee, J.W. Lee, M.D. Candelaria // Sensors. – 2020. – 20: 201. <https://doi.org/10.3390/s20010201>

110. Kee, SH. Automated Surface Wave Measurements for Evaluating the Depth of Surface-Breaking Cracks in Concrete / SH. Kee, B. Nam // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2015. – 9. – 307–321. <https://doi.org/10.1007/s40069-015-0110-y>

111. Shin, S. W. Crack depth estimation in concrete using energy transmission of surface waves / S. W. Shin, J. Zhu, J. Min, J. S. Popovics // ACI Materials Journal. – 2008. – 105(5). – 510–516.

112. Ryden, N. (2003), Lamb Wave Analysis for Non-Destructive Testing of Concrete Plate Structures / N. Ryden, Ch. B. Park, P. Ulriksen, R. D. Miller // Symposium

on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems Proceedings: – 2003. – 782–793. URL:[//doi.org/10.4133/1.2923224](https://doi.org/10.4133/1.2923224)

113. Распорская, Л. Д. Применение метода поверхностных волн для выявления связи между слоями бетона / Л. Д. Распорская, Д. А. Савин, И. В. Ситников // Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения : Материалы III Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 25–26 сентября 2019 года. – Санкт-Петербург: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2019. – С. 148-150.

114. José M. Carcione. Rayleigh waves in isotropic viscoelastic media / José M. Carcione // Geophysical Journal International. – 1992. – Volume 108, Issue 2. – 453–464. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb04628.x>

115. Thitimakorn, T. 2-D Shear-Wave Velocity Profile Along Test Segment of Interstate I-70, St. Louis, Missouri / T. Thitimakorn, N. L. Anderson, R. Stephenson, W. Liu // Site Characterization and Modeling. – 2005. doi: 10.1061/40785(164)14

116. Lee, B. J. Evaluating the Dynamic Elastic Modulus of Concrete Using Shear-Wave Velocity Measurements / B. J. Lee, S.-H. Kee, T. Oh, Y.-Y. Kim // Advances in Materials Science and Engineering. – 2017. – 1. DOI: 10.1155/2017/1651753

117. Liew, C. H. Behavioural study of surface Rayleigh waves in concrete structure containing delamination / C. H. Liew, F. W. Lee, D. S. Tan, J. H. Lim, M. K. Yew, Y. B. Woon // J. Civil Struct Health Monit. – 2019. – 9. – 555–564. <https://doi.org/10.1007/s13349-019-00353-8>

118. Edouard, M. Geological anomalies search in dikes using surface wave properties, processing (MASW and DCOS): application a an experimental site (Agly -66) / M. Edouard, G. Durand, A. Clement, P. Meriaux // 6Th GEOFCAN Symposium. – 2007. – France.

119. Lv, H. Analysis of Rayleigh wave dynamic response and propagation characteristics in layered site / H. Lv // Sci Rep. – 2024. – 14, 22524. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73600-8>

120. Chekroun, M. Analysis of coherent surface wave dispersion and attenuation for non-destructive testing of concrete / M. Chekroun, L. Le Marrec, O. Abraham, O. Durand, G. Villain // *Ultrasonics*. – Elsevier, 2009. – 49 (8). – pp 743-751. 10.1016/j.ultras.2009.05.006 . hal-00436273
121. Блохин Д. И. Опыт использования геофизических методов для оценки фактических конструктивных параметров железобетонных фундаментных плит / Д. И. Блохин, А. С. Вознесенский, И. И. Кудинов [и др.] // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2011. – № 2. – С. 283-289.
122. Капустин, В. В. Опыт применения георадиолокации для контроля качества фундаментных плит / В. В. Капустин, А. А. Чуркин, М. П. Широбоков // *Геотехника*. – 2021. – Т. 13, № 1. – С. 68-81. – DOI 10.25296/2221-5514-2021-13-1-68-79.
123. Чуркин, А. А. Оценка условий контакта конструкций с грунтовым массивом по атрибутам нормированного акустического отклика / А. А. Чуркин, А. Ю. Хмельницкий, В. В. Капустин // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2022. – № 5. – С. 17-21.
124. Стихановский, Б. Н. Метод упругого отскока для контроля качества материалов и конструкций / Б. Н. Стихановский, Е. С. Чернова // *Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научно-практической конференции, Омск, 07 февраля 2014 года* / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2014. – С. 350-355.
125. Khan A. Determining material characteristics of “Rammed Earth” using Non-Destructive Test methods for structural design / A. Khan, R. Gupta, M. Garg // *Structures*. – 2019. – Vol. 20. – 399–410. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.05.003>.
126. Дзенис В.В. Акустические методы контроля в технологии строительных материалов / В. В. Дзенис, В. Г. Васильев, И. Э. Зоммер [и др.]. – Ленинград : Стройиздат, 1978. – 152 с.
127. Савин С. Н. Сейсмоакустические методы интегральной оценки физико-механических характеристик строительных конструкций зданий и сооружений / С. Н.

Савин, В. М. Попов, Ю. В. Пухаренко [и др.] // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 6.

128. Savin S. The use of elastic oscillations of different wavelengths to evaluate the dynamic parameters of buildings and structures and assess the strength of materials of the building construction / S. Savin, V. Tsakalidis // Proc. 5th Int. Conf. Comput. Methods Struct. Dyn. Earthq. Eng. (COMPDYN 2015) / Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research School of Civil Engineering National Technical University of Athens (NTUA). – Greece, Athens, 2015: pp. 706-720. DOI: [10.7712/120115.3424.1671](https://doi.org/10.7712/120115.3424.1671)

ПРИЛОЖЕНИЕ

Акты внедрения



В Диссертационный совет 24.2.380.01
при Санкт-Петербургском государственном
архитектурно-строительном университете

СПРАВКА

О внедрении результатов диссертации Фан Чунг Дыка на тему:
**«Развитие метода мониторинга технического состояния плоскостных
каменных конструкций с использованием изгибных волн Лэмба»**

Настоящей справкой информируем диссертационный совет 24.2.380.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете в том, что результаты диссертационных исследований Фан Чунг Дыка на тему «Развитие метода мониторинга технического состояния плоскостных каменных конструкций с использованием изгибных волн Лэмба» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.1 – строительные конструкции, здания и сооружения приняты к использованию в практике обследования Санкт-Петербургской ООО «ИСП «Геореконструкция» для оценки механических характеристик конструкций кирпичных сводов.

Генеральный директор,
д-р геол.-минерал. наук



А.Г. Шашкин

геотехника, изыскания и обследования, архитектурно-строительное проектирование

190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., д. 4,
литер А, помещение 20-Н
ОКПО 85596454 ОГРН 1089847236632
ИНН/КПП 7839384343/783901001

тел.: +7 (812) 339-35-87

факс: +7 (812) 575-36-25

E-mail: mail@georec.spb.ru www.georec.spb.ru

Công ty TNHH TNT CORP

Thành phố Đà Nẵng, Việt Nam

Hội đồng khoa học luận án tiến sĩ 24.2.380.01

CHỨNG NHẬN

Về việc áp dụng kết quả nghiên cứu luận án tiến sĩ của Phan Chung Đức
với đề tài: « Phát triển phương pháp giám sát tình trạng kỹ thuật của kết cấu
gạch đá dạng tấm và tường bằng sóng uốn Lamb »

Bằng chứng nhận này chúng tôi thông báo cho hội đồng bảo vệ luận án tiến sĩ và tiến sĩ khoa học 24.2.380.01 tại Đại học Kiến trúc – Xây dựng St. Peterburg rằng kết quả nghiên cứu của Phan Chung Đức về đề tài: « **Phát triển phương pháp giám sát tình trạng kỹ thuật của kết cấu gạch đá dạng tấm và tường bằng sóng uốn Lamb** » cho mức độ tiến sĩ khoa học kỹ thuật chuyên ngành 2.1.1 – kết cấu xây dựng, tòa nhà và công trình được sử dụng ở công ty **TNHH TNT CORP** để giám sát và xây dựng phương pháp gia cường kết cấu dạng tấm và tường.

Công ty TNHH TNT CORP



«ООО» TNT CORP

Город Дананг, Вьетнам

Диссертационный совет 24.2.380.01

СПРАВКА

О внедрении результатов диссертации Фан Чунг Дыка на тему:

«Развитие метода мониторинга технического состояния плоскостных каменных конструкций с использованием изгибных волн Лэмба»

Настоящей справкой информируем диссертационный совет 24.2.380.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете в том, что результаты диссертационных исследований Фан Чунг Дыка на тему **«Развитие метода мониторинга технического состояния плоскостных каменных конструкций с использованием изгибных волн Лэмба»** на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения приняты к использованию в «ООО» TNT CORP для мониторинга и разработки методов усиления плитных и стеновых конструкций.

«ООО» TNT CORP

Директор

