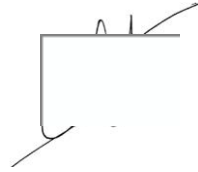


*На правах рукописи*



**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

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

- Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник  
**Савин Сергей Николаевич**
- Официальные оппоненты: **Сычева Анастасия Максимовна**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского», г. Санкт-Петербург, 115 лаборатория военного института научно-исследовательского ВИ(НИ), старший научный сотрудник;  
**Курлапов Дмитрий Валерьевич**  
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Строительные конструкции, здания и сооружения», доцент;
- Ведущая организация: **Военный институт (инженерно-технический) ФГКВОУ ВО «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева», г. Санкт-Петербург.**

Защита диссертация состоится «10» июня 2025 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория №220 главного корпуса). Тел./Факс: (812) 316–58–73; E-mail: [rector@spbgasu.ru](mailto:rector@spbgasu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ «Санкт-Петербургский государственный архитектурно – строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialty/personal/fan-chung-dyk>

Автореферат разослан «21» апреля 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



В. М. Попов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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, М. 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, А. V. Ilyashenko, 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, K.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.

**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 изгибных 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 Рэлеевой 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 предложенной формуле) для определения скорости распространения рэлеевой 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 достоверность 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 диссертационной 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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**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** проанализированы основные проблемы, возникающие при обследовании здания и сооружений. Выполнен обзор экспериментальных, аналитических и теоретических исследований отечественных и зарубежных ученых по оценке механических характеристик бетона и каменной кладки неразрушающими методами. Рассмотрены основные неразрушающие методы, рекомендуемые в действующих нормативных документах и приведены их достоинства и недостатки.

На данный момент существует много проблем при обследовании здания 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.

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.

При изучении отечественных и зарубежных литературных источников предлагается использовать метод с использованием акустических и сейсмических волн. 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. 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 метод является эффективным инструментом 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 механических 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.

**Во второй 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.

Для исследования характера распространения в плоскостных каменных конструкциях разночастотных волн следует привлечь теоретические выводы Лэмба к изгибным волнам. Тогда дисперсионную кривую для основных колебаний антисимметричных волн определяют из характеристического уравнения, полученного Лэмбом в таком виде:

$$\frac{\text{th}\beta_1 H / 2}{\text{th}\beta_2 H / 2} = \frac{4\beta_1 \beta_2}{\eta^2 \xi^2}, \quad (1)$$

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 настоящее время широко применяется метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW), который позволяет определять скорости распространения рэлеевской волны. Эта волна формируется вблизи свободной поверхности, а составляющие их частицы демонстрируют эллиптическое движение. Это движение перпендикулярно поверхности и включает в себя смещение в направлении распространения. Скорость распространения волны Релея определяют с использованием следующего уравнения:

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

где  $V_R$  – скорость рэлеевской волны;

Решение уравнения (2) приводит к значениям скорости Рэлеевской волны. Следовательно, это значение выражено по формуле:

$$V_R = \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{\rho(1 + \mu)}} = V_p \cdot \sqrt{\frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)}} \cdot \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \quad (3)$$

Из уравнений (1, 3) следует, что зависимость между безразмерными параметрами  $V_u/V_R$  и  $\lambda/H$  может быть выражено как:

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

$\Leftrightarrow$

$$\begin{aligned}
& \frac{th(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{V_u^2(1-2\mu)(0,87+1,12\mu)^2}{2V_R^2(1-\mu)(1+\mu)^2}})}{th(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{V_u^2(0,87+1,12\mu)^2}{V_R^2(1+\mu)^2}})} = \\
& = \frac{4\sqrt{(1 - \frac{V_u^2(1-2\mu)(0,87+1,12\mu)^2}{2V_R^2(1-\mu)(1+\mu)^2})(1 - \frac{V_u^2(0,87+1,12\mu)^2}{V_R^2(1+\mu)^2})}}{(2 - \frac{V_u^2(0,87+1,12\mu)^2}{V_R^2(1+\mu)^2})^2}
\end{aligned} \tag{5}$$

По уравнению (5) можно доказать, что при  $f = 0$   $V_u/V_R \rightarrow 0$ , а при  $f = \infty$   $V_u/V_R \rightarrow 1$ , и тогда  $V_u = V_R$ . В этом случае при  $f = \infty$  можно оценить характеристик материалов с помощью метода MASW. Для различных диапазонов частот дисперсионное уравнение (1) является трансцендентным уравнением, и решить его непросто. Из теоретических формул упругости после преобразования уравнения (1) получаем функцию  $F(\alpha)$ :

$$F(\alpha) = (p-1)\alpha^{g+h} - (p+1)\alpha^g + (p+1)\alpha^h - (p-1) = 0 \tag{6}$$

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

$$h = \sqrt{1 - \frac{V_u^2}{V_R^2} \frac{(0,87+1,12\mu)^2}{(1+\mu)^2}}; \quad \lambda_B - \text{Длина волны; } V_R - \text{скорость Рэлеевской}$$

волны;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Очевидно, что колебания изгибных волн распространяются со скоростью, которая зависит от частоты колебания, а также от толщины и упругих свойств плит. Конечное решение из уравнения (6) 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 плоскостных каменных конструкций, обнаружения дефектов и повреждений при решении обратных задач на реальных объектах. Некоторые результаты представлены в рисунке 1.

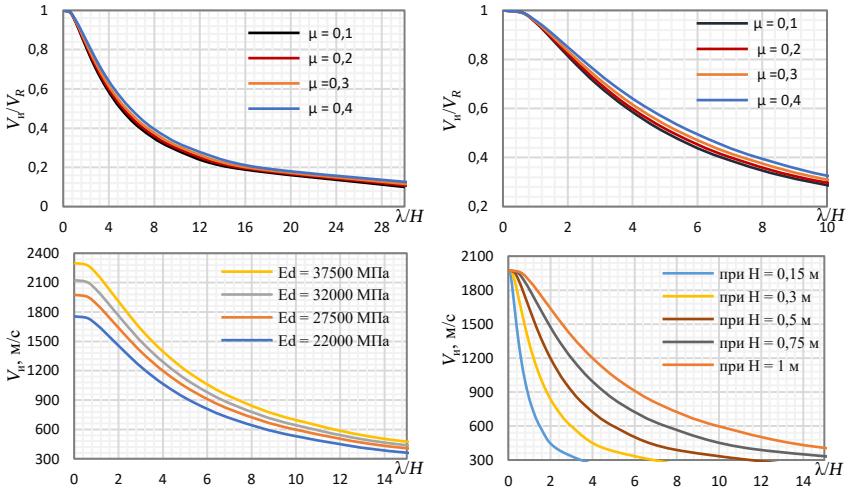


Рисунок 1. Дисперсионные кривые изгибных волн при различных коэффициентах Пуассона, различных прочностей и толщин конструкций

Следует подчеркнуть, что в диапазоне значений  $0,4 < V_w/V_R < 0,7$  кривая на графике представляет собой отрезок прямой линии. При этом мы можем написать уравнение прямой с использованием рис. 1 в случае  $\mu = 0,25$ :

$$\frac{V_R}{V_w} = 0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H} \quad (7)$$

Средняя величина скорости волны Рэлея рассчитывается по следующей формуле:

$$\bar{V}_R = \frac{b-a}{k} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k V_w^i}{\int_a^b \frac{1}{0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H}} d\left(\frac{\lambda}{H}\right)} \quad (8)$$

Где:  $k$  – количество отсчетов фазовых скоростей в диапазоне частоты при выполнении условия  $0,4 < V_w/V_R < 0,7$ ;  $a, b$  – значения отношения  $\lambda/H$ , 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 %.

Из уравнения (6) следует, что скорость распространения изгибных волн распространяются со скоростью, которая сильно зависит от их частоты. Выше показано, что, когда длина волны стремится к бесконечности,

тогда скорость изгибных 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. Экспериментальные исследования дисперсионных кривых на реальных объектах также показывают значительное влияние используемых частот на значения скорости распространения изгибных волн. На рис. 2 представлены дисперсионные кривые скоростей изгибных волн в зависимости от их длин для объектов по адресам: г. Москва, ул. Азовская, д. 24 и Московская обл., Домодедовский р-н, п. Павлово, склад (здание № 13).

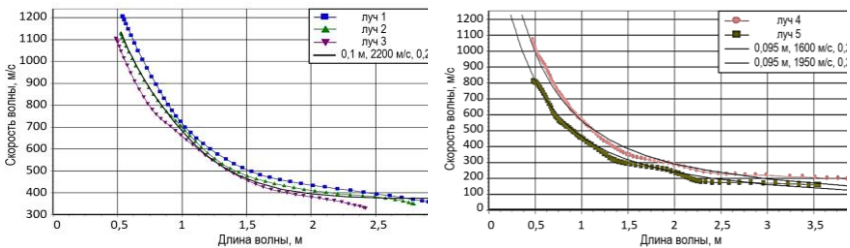


Рисунок 2. Дисперсионные кривые скоростей изгибных волн бетонных плит в реальных объектах в г. Москве

Полученные практические и теоретические данные свидетельствуют, что с увеличением длины волны точность измерений скорости распространения волн снижается. Действительно, использование изгибных волн с отношением  $\lambda/H$  более 10 может привести к ошибочным результатам при оценке свойств строительных материалов. Использование таких низких частотных диапазонов в ходе обследования создает трудности в обнаружении повреждений и дефектов в плоскостных каменных конструкциях, тем самым препятствуя возможности различать поврежденные и неповрежденные конструкции. В дальнейшем исследовании после выбора оптимального частотного диапазона изгибных волн требуется разработать методику для решения задачи определения механических характеристик материала и выявления дефектов и повреждений в конструкции.

**В третьей главе** рассмотрен метод определения механических характеристик конструкций 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 скоростей распространения изгибных волн.

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 годографов скорости монохроматических волн по длине измерительного створа.

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.а. 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).

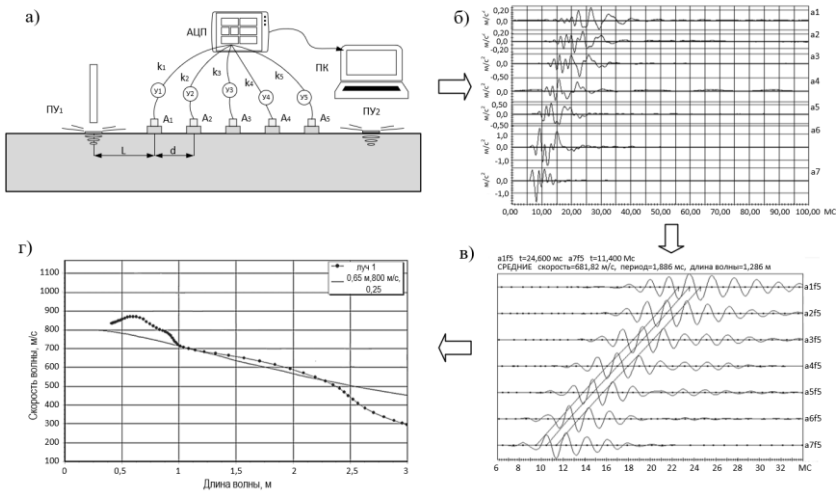


Рисунок 3. Схема этапов проведения испытания с целью построения дисперсионных кривых

Обработка экспериментальных реализаций проводится в несколько этапов. Исходные реализации (см. на рис. 3.б) волновых процессов, полученные при прямом и обратном направлениях распространения волны, разделяются при обработке на монохроматические пучки (см. на рис. 3.в) с помощью группы полосовых фильтров. Затем по каждому монохроматическому пучку строятся годографы распространения волны. Годографы строятся по максимумам (положительным и отрицательным) колебаний или реже по точкам пересечения графиком колебаний нулевой линии. По каждому годографу определяются: времена пробега между соседними точками измерения

и всему измерительному лучу; средняя фазовая скорость волны; средний период колебаний; длина волны. Для построения дисперсионных кривых (см. на рис. 3.г) используется массив данных в координатах «скорость волны – ее длина». На рисунке 3 представлена схема этапов экспериментального построения дисперсионных кривых распространения волны.

На основе исходных данных для математических моделей о конструкции построены также теоретические дисперсионные кривые. Верификация математических моделей осуществляется методом итераций путем внесения в нее изменений, намеченных по результатам сравнительной оценки расчетных и экспериментальных дисперсионных кривых (сравнение значения по теоретическим дисперсионным кривым в коротких диапазонах длин и по предложенной формуле 8), выполнения расчетов реакций плиты и на импульсные воздействия, обработки этих результатов и сравнения новых расчетных дисперсионных кривых с экспериментальными. И так до тех пор, пока не будет достигнуто удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных дисперсионных кривых. Только после того представлена интерпретация результатов обследования и выдача результатов о механических, геометрических характеристиках плоскостных каменных.

*Методика оценки параметров плоскостных каменных конструкций по дисперсионным кривым скоростей распространения изгибных волн:*

Метод определения механических характеристик плоскостных каменных конструкций основан на связи скоростей распространения упругих волн с упругими и прочностными характеристиками материалов строительных конструкций. По результатам экспериментального обследования построены дисперсионные кривые и определены скорости распространения рэлееской волны. Из уравнений (3), (7) и (8) динамический модуль упругости материалов при  $\mu_d = 0,25$  возможно вычисляют по формуле:

$$E_d = 2,95\rho V_n^2 (0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H})^2 \quad (9)$$

Среднее значение динамического модуля упругости определяют по формуле:

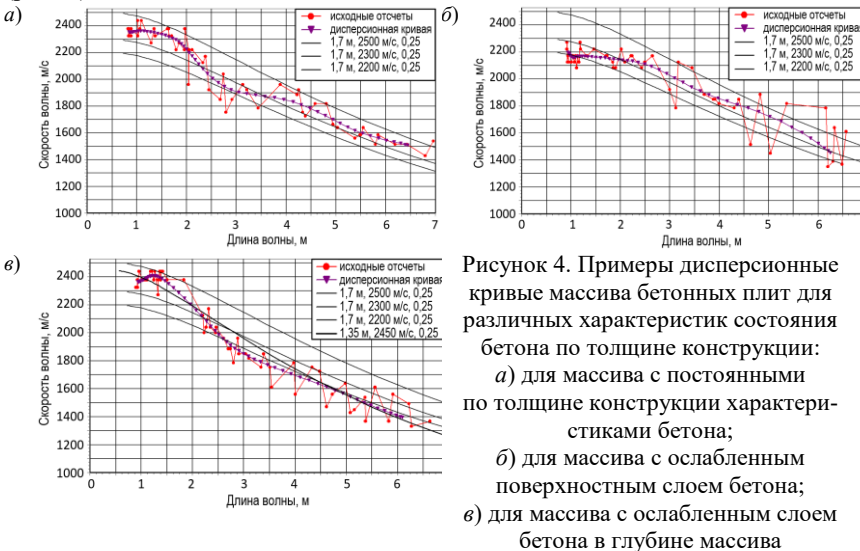
$$\overline{E}_d = 2,95\rho \overline{V}_R^2 \quad (10)$$

Прочности бетона и кирпичных кладок по скорости продольной волны оценивается с помощью градуировочной кривой для бетона и таблицы классификации прочности кладки по скоростям продольных волн (см. табл. 1).

Таблица 1 - 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  |
| Очень слабой прочности | 0,5...1     | ~500        |

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 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 (рис. 4).



При наблюдении скоростей распространения изгибных волн 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 плоскостных каменных конструкций, а также может использоваться для оценки свойств 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.

**В четвертой 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.

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 5.



Рисунок 5. Датчики и регистрирующая аппаратура типового измерительного комплекса

Измерительная схема представляет собой последовательное соединение первичных измерительных преобразователей (акселерометров), согласующих усилителей, многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и персонального компьютера (ПК).

Как видно на фотографиях (рис. 5), в качестве ударника используется деревянный брус. Такой ударник используется для возбуждения Рэлеев-

ских и изгибных волн. Основное достоинство деревянного ударника состоит в том, что удар получается достаточно жестким для возбуждения колебаний в диапазоне частот от 25–30 Гц до 2–3 кГц. Дополнительно для улучшения визуального представления волнового поля используются согласующие усилители сигналов.

Датчики фиксируются с постоянным шагом (0,2...1м), не превышающим минимальную длину измерительных волн и образуют измерительный луч. Т.к.  $V_R/V_n \geq 1$ , из формулы (7)  $\rightarrow 0,63 + 0,26\lambda/H \geq 1$ . Тогда при использовании волн с длиной  $\lambda \geq 1,4H$  уже можно рассматривать распространение изгибных волн в конструкциях и правильно подобрать шаг расстановки измерительных датчиков, даже если не известны ожидаемые акустические характеристики.

При известных ожидаемых акустических характеристиках применение формулы 7 дает возможность определить шаг расстановки датчиков. Уравнение 7 можно представить в следующем виде:

$$V_R = (0,63 + 0,26 \frac{V_n}{f \cdot H}) \cdot V_n \quad (11)$$

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

$$\lambda_{\min} = \frac{V_n^{\max}}{f_{\max}} \quad (12)$$

В случае, если при решении уравнения (11) полученное значение максимальной скорости изгибной волны  $V_n^{\max}$  превышает  $V_R$ , принимают значение  $V_n^{\max}$  равным  $V_R$  и подставляют его в формулу (12) для определения  $\lambda_{\min}$ . Отсюда появляется возможность определить шаг расстановки акселерометров  $a \leq \lambda_{\min}$ .

*Определение скоростей распространения упругих волн  
в плоскостных каменных конструкциях реконструируемого здания*

Определение скоростей распространения упругих волн кирпичной кладки стен выполнялось в соответствии со схемой расположения измерительных створов (лучи 1–5) для зданий по адресам: Санкт-Петербург, Уткин проспект, дом 46 (рис. 6.а) и Москва, Малый Знаменский переулок, дом 3/5 (рис. 6.б). Дисперсионные кривые изгибных волн в стенах показаны на рис. 7, а результаты оценок скоростей распространения упругих волн в кладке после обработки данных приведены в табл. 2.

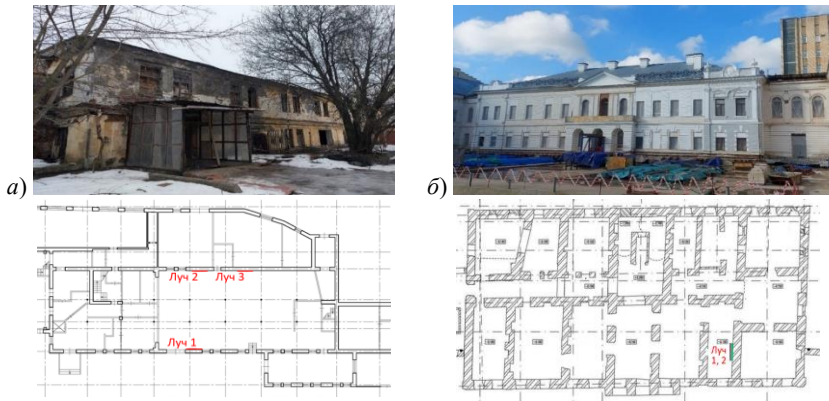


Рисунок 6. Обследуемые здания и схема зон инструментального обследования

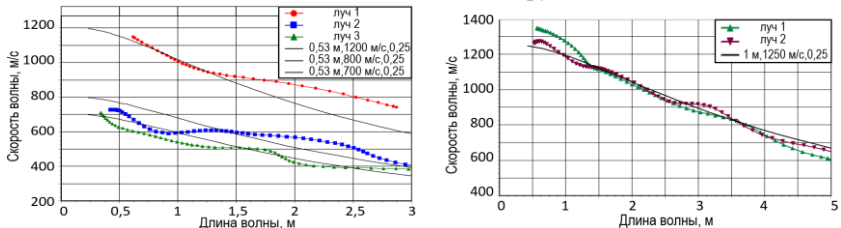


Рисунок 7. Дисперсионные кривые изгибных волн в кладке

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 с минимальной погрешностью.

Таблица 2 – Оценка скоростей распространения упругих волн в кладке здания

| Обследуемые здания                         | Диспер. кривые | $V_R$ , м/с | $\bar{V}_R$ , м/с | $V_P$ , м/с | $\bar{V}_P$ , м/с | Погрешность, % |
|--------------------------------------------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|----------------|
| 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            |
| 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 таблице 2 с погрешностями менее 10 % показывают возможность использования разработанного метода при оценке механических характеристик в конструкциях;
- полученные результаты подтверждают возможности эффективной диагностики строительных конструкций предложенным методом.

#### *Определение прочностных характеристик каменных кладок*

Оценка прочностных характеристик кирпичной кладки методом с использованием изгибных волн выполнялась в соответствии со схемой инструментального обследования, приведенной на рисунке 3.а. Процесс проведения испытаний представлен на рисунке 8, результаты в виде дисперсионных кривых распространения изгибных волн в кладке в зависимости от их длин показаны на рисунке 9.



Рисунок 8. Проведение испытаний методом изгибных волн с измерительным комплексом и возбуждением с использованием тампера

По известным данным о средних значениях испытаний прочности кирпича ( $R_k$ ) и раствора ( $R_p$ ) также определяют прочность кладки по формуле Онищика ( $R$ ) и Еврокода 6 ( $f_d$ ). 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. 3.

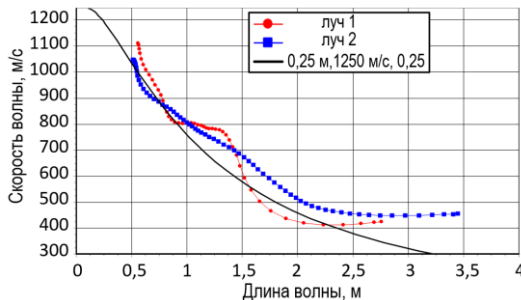


Рисунок 9. Результаты испытаний в виде дисперсионных кривых

Таблица 3 – Оценка прочностных характеристик кирпичных стен

| Обслед.<br>объект                                                                               | $R_k$ ,<br>МПа | $R_p$ ,<br>МПа | $R$ ,<br>МПа | $f_d$ ,<br>МПа | Дисп.<br>кривые | $V_R$ ,<br>м/с | $R_p$ ,<br>МПа | $\lambda$ ,<br>м | $\bar{V}_R$ ,<br>м/с | $\bar{R}_p$ ,<br>МПа | Сред.<br>Знач.<br>МПа |  |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|--------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|--|--|
| Ленин-<br>градская<br>область,<br>Выборг-<br>ский<br>район, ул.<br>Смоляч-<br>ковская, д.<br>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                 |                       |  |  |

Проведен сравнительный анализ результатов, полученных в ходе натурных исследований, с результатами других методов (формула Л.И. Онищика, Eurocode 6) по определению прочности кирпичной кладки. При этом прочности кладки, определяющейся методом изгибных волн (по предложенной формуле 8), отмечается удовлетворительное совпадение с результатом расчета по формуле Онищика. Разница обусловлена коэффициентом вариации материалов, отличиями ухода за кладкой, а также разницей в условиях испытаний на объекте и в лаборатории.

*Контроль проектной толщины и оценка упругих характеристик бетонных плит и кирпичных кладок существующих зданий*

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 усложняет оценку качества строительных материалов и проверку фактической толщины конструкции инспекторами. Основываясь на данных по использованию сейсмоакустических волн в геологоразведке, можно аналогичным способом использовать 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 бетонную плиту с размерами 5×6 м и толщиной 27 см (см. рис. 10).



Рисунок 10. Фундаментная бетонная 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 для соответствующих изгибных волн в зависимости от их длин (см. рис. 11). 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.

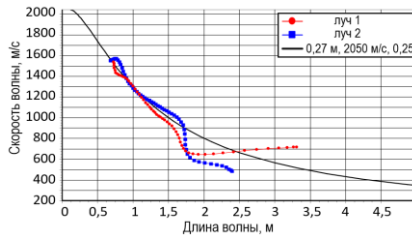


Рис. 11. Дисперсионные кривые изгибных волн бетонной фундаментной плиты

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 – Оценка проектной толщины и упругих характеристик фундаментной бетонной плиты

| Обслед.<br>здание                                                                 | Дис.<br>кри-<br>вые | $V_R$ ,<br>м/с | Факт.<br>тол-<br>щина, м | $E_d$ ,<br>МПа | $\lambda$ ,<br>м | Толщи-<br>на,<br>м | Сред.<br>зна-<br>чение | По-<br>греш-<br>ность | $\bar{V}_R$ ,<br>м/с | $\bar{E}_d$ ,<br>МПа | По-<br>греш-<br>ность |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------------------|----------------|------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Ленингр. об-<br>ласть, Вы-<br>боргский<br>район, ул.<br>Смолячков-<br>ская, д. 43 | Луч 1               | 2050           | <b>0,270</b>             | <b>30993</b>   | 0,5-1            | 0,282              | <b>0,249</b>           | 7,8%                  | 1890                 | <b>26344</b>         | 15%                   |
|                                                                                   |                     |                |                          |                | 1-1,5            | 0,286              |                        |                       |                      |                      |                       |
|                                                                                   |                     |                |                          |                | 1,5-2            | 0,243              |                        |                       |                      |                      |                       |
|                                                                                   |                     |                |                          |                | 2-2,5            | 0,183              |                        |                       |                      |                      |                       |
|                                                                                   | Луч 2               |                |                          |                | 0,5-1            | 0,265              | <b>0,250</b>           | 7,4%                  | 1930                 | <b>27471</b>         | 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.

Метод изгибной волны используется для оценки механических характеристик плоскостных конструкций, в том числе толстостенных, при наличии доступа только к одной поверхности конструкции. Проверка проектной толщины и определение упругих характеристик кирпичной кладки стен существующего здания на Каменноостровском проспекте д. 61 выполнялись в соответствии со схемой инструментального обследования, приведенной на рисунке 3.а. А схема проведения испытаний с измерительным комплексом и результаты в виде дисперсионных кривых распространения изгибных волн в кладке в зависимости от их длин представлены на рисунке 12. Результаты после обработки данных дисперсионных кривых, приведенные в табл. 5.

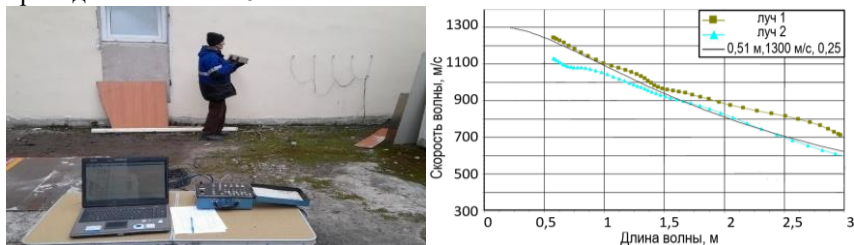


Рисунок 12. Проведение испытаний с измерительным комплексом и дисперсионные кривые изгибных волн в кладке

Таблица 5 – Оценка проектной толщины и упругих характеристик кладки стен зданий

| Обслед.<br>здание                           | Дис.<br>кри-<br>вые | $V_R$ ,<br>м/с | Факт.<br>Толщ.,<br>м | $E_d$ ,<br>МПа | $\lambda$ ,<br>м | Тол-<br>щина,<br>м | Сред.<br>Знач.,<br>м | По-<br>греш-<br>ность | $\bar{V}_R$ ,<br>м/с | $\bar{E}_d$ ,<br>МПа | По-<br>греш-<br>ность |
|---------------------------------------------|---------------------|----------------|----------------------|----------------|------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Каменно-<br>Островский<br>проспект д.<br>61 | Луч 1               | 1300           | <b>0,51</b>          | <b>8725</b>    | 1-1,5            | 0,52               | <b>0,57</b>          | 11,7%                 | 1403                 | <b>10162</b>         | 16,5%                 |
|                                             |                     |                |                      |                | 1,5-2            | 0,57               |                      |                       |                      |                      |                       |
|                                             |                     |                |                      |                | 2-2,5            | 0,63               |                      |                       |                      |                      |                       |
|                                             | Луч 2               |                |                      |                | 1-1,5            | 0,47               | <b>0,50</b>          | 2,0%                  | 1284                 | <b>8511</b>          | 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 которой обусловлены разницей между экспериментальными дисперсионными кривыми и теоретическими (сплошная черная линия в рис. 12). 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 5 показана разница динамических модулей упругости общей толщины и поверхностных слоев. Она составляет 16,5 %. Это можно объяснить влиянием внешних климатических факторов, которые снизили прочность наружного кирпично-строительного слоя и привели к уменьшению значения скорости распространения изгибных волн в диапазоне коротких длин волн.

#### *Результаты испытаний кирпичных сводов*

На основе теоретических и экспериментальных исследований по применению изгибных волн в плоскостных каменных конструкциях 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 недостаточно 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 13. Результаты испытаний в виде зависимости скорости распространения волн от длины волны обобщены и представлены на рисунке 14.



Рисунок 13. Участки проведения испытания и установки измерительного оборудования

На рисунке 14, 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 15). Сравнение этих результатов представлено в таблице 6.

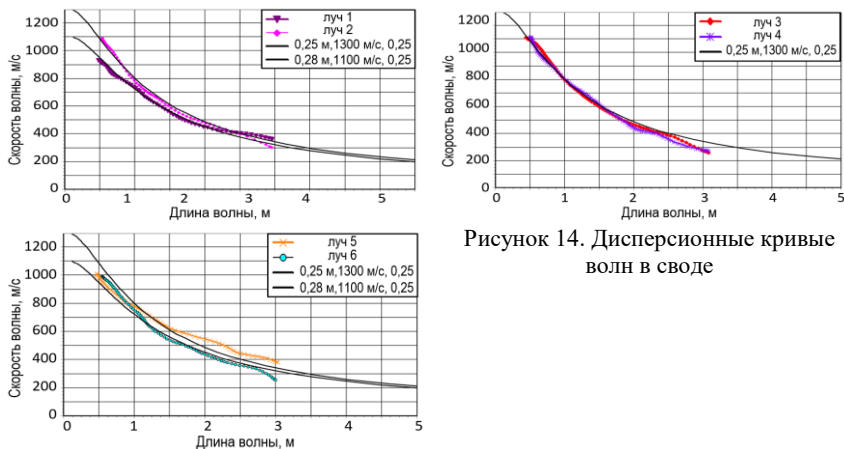


Рисунок 14. Дисперсионные кривые волн в своде



Рисунок 15. Результаты измерения толщины кирпичной кладки в каждом своде

Таблица 6 - Оценка проектной толщины и акустических характеристик сводов

| Обслед.<br>здание                                          | Диспер.<br>кривые | Толщина,<br>м | Факт. тол-<br>щина, м | Погрешность<br>(по толщине),<br>% | $V_R$ ,<br>м/с | $\bar{V}_R$ ,<br>м/с | $V_R / \bar{V}_R$ |
|------------------------------------------------------------|-------------------|---------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------|----------------------|-------------------|
| Москва,<br>Малый Зна-<br>менский пере-<br>улок,<br>дом 3/5 | луч 1             | 0,28          | 0,3                   | 6,7                               | 1100           | 1089                 | 1,01              |
|                                                            | луч 2             | 0,25          | 0,3                   | 16,7                              | 1300           | 1150                 | 1,13              |
|                                                            | луч 3             | 0,25          | 0,3                   | 16,7                              | 1300           | 1181                 | 1,10              |
|                                                            | луч 4             | 0,25          | 0,3                   | 16,7                              | 1300           | 1170                 | 1,11              |
|                                                            | луч 5             | 0,25          | 0,3                   | 16,7                              | 1300           | 1188                 | 1,09              |
|                                                            | луч 6             | 0,28          | 0,3                   | 6,7                               | 1100           | 1072                 | 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 каменных конструкциях при оценке акустических и механических характеристик. По другим участкам, где конструкция свода имеет более высокий подъем, результаты существенно отличаются (лучи 2-5). Но в любом случае при одиноковой толщине скорость распространения акустических волн в своде превышает скорости в плоскостных конструкциях. 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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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  $\Gamma$ . 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 РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:**

1. 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.

2. Савин, С. Н. Оценка прочностных характеристик кирпичной кладки с использованием изгибных волн / С. Н. Савин, Ч. Д. Фан, А. О. Хегай, В. Т. Ле // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 10.

3. Савин, С. Н. Контроль технического состояния зданий и сооружений по их динамическим характеристикам / С. Н. Савин, Ч. Д. Фан // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2024. – № 1(47). – С. 20-27. – DOI 10.52684/2312-3702-2024-47-1-20-27.

4. 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.

5. 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.

6. 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. – DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-3-28-34.

**В других изданиях:**

7. Fan Ch. D. Selection of optimal frequency range of bending waves for inspection of building / Ch. D. Fan, S. Savin, A. Khegai, V. Tr. Le // AIP Conf. Proc. – 2024. – 3243 (1): 020030. <https://doi.org/10.1063/5.0247283>

8. Савин, С. Н. Исследование распространения изгибных волн в конструкции плитного типа в различных диапазонах частот / С. Н. Савин, Ч. Д. Фан // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: Материалы X-й Международной научно-практической конференции. – Тамбов: ТГТУ, 2024. – С. 161-166.

9. Фан, Ч. Д. Теоретические аспекты применения метода с использованием изгибных волн в обследовании строительных конструкций / Ч. Д. Фан // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: Материалы XVI Международной научно-технической конференции. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2023. – С. 10-15.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 04.04.2025. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,6. Тираж 120 экз. Заказ 38.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А