

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-41-53

Фан Ч.Д.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: phanchungduc@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗГИБНЫХ ВОЛН ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ ПЛИТНЫХ И СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. В статье рассмотрена возможность оценки жесткостных и прочностных характеристик по толщине плитных и стеновых конструкций по результатам экспериментальных исследований измерений скоростей распространения изгибных волн различных диапазонов частот. Построены теоретические дисперсионные кривые скоростей изгибных волн в зависимости от их длин для плитных конструкций различных характеристик при различной толщине. Представлена формула определения скоростей распространения поверхностной рэлеевской волны. Отсюда определены жесткостные характеристики по корреляционным зависимостям между ними и скоростью распространения продольной волны. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов для оценки состояния материалов по толщине плит. Проведены экспериментальные измерения скоростей распространения изгибных волн на стенах существующего здания в г. Санкт-Петербурге и произведена первичная оценка жесткостных свойств кладки и контроль проектной толщины стены. Результаты проведенных исследований подтвердили возможность оценки характеристик состояния материалов по толщине плитных и стеновых конструкций путем сопоставления экспериментальных исследований измерений скоростей распространения изгибных волн на различных диапазонах частот. Использование метода изгибных волн также позволяет осуществлять контроль проектной толщины плиты, стены и обделки при одностороннем доступе.

Ключевые слова: скорость изгибных волн, жесткостные характеристики, толщины плиты, экспериментальные исследования, акустические диапазоны частот.

Введение. На сегодняшний день обследование зданий и сооружений ставит перед нами множество сложных задач и проблем, особенно при оценке физико-механических характеристик материалов строительных конструкций в труднодоступных местах (фундамент, фундаментные стены, перекрытия, покрытия...) при проведении изысканий, а также для многослойных конструкций [1, 2]. Поскольку эти конструкции являются одними из самых уязвимых и сложных участков для проверки, и, как правило, требуют надежной 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 диагностики прочностных характеристик строительных материалов.

Кроме того, с точки зрения экономики, для уменьшения трудозатрат в человеко-часах и продолжения процесса эксплуатации зданий и сооружений при их обследовании, развитие различных современных неразрушающих методов является весьма важным и неизбежным [3–6]. Применения разрушающих методов, несмотря на все их преимущества, отличаются высокой трудоемкостью и необходимостью проведения высококвалифицированных камеральных исследований [7].

Несмотря на очевидные преимущества, большинство неразрушающих методов также имеют некоторые ограничения и недостатки. Обычно испытания с использованием неразрушающих методов нам дают косвенные результаты, поэтому надежность и достоверность их не очень высока. И эти результаты оцениваются только для типично отдельных точек либо верхних слоев конструкций [8] и иногда это не полностью отражает все характеристики, а также свойства материалов всей обследуемой конструкции. Кроме того, для правильной и полной оценки качества зданий и сооружений также следует учитывать ограничения доступа к некоторым элементам конструкций (фундаментные стены, стены и плиты перекрытий и покрытия). Проблема разработки методики, которая позволяет одновременно получать большой объем данных с требуемой достоверностью на протяженных участках измерений и даже при одностороннем доступе к конструкции, очень важна и актуальна.

В настоящее время на наш взгляд, метод [9–13] с использованием изгибных волн акустического диапазона 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 только к измерениям только по наружной поверхности [14].

Материалы и методы. Для дальнейшего исследования характера распространения в плитах и стенах волн различной длины волны следует рассмотреть теоретические выводы Лэмба [15-17], который показал, что при возбуждении в сплошной однородной бесконечной плите непрерывных синусоидальных колебаний в ней рас-

пространяется два типа волн. Как известно: первый тип – симметричный; второй тип – антисимметричный, см. рис. 1. В симметричных волнах колебание материальных точек симметрично по отношению к средней плоскости плиты, т.е. в верхней и нижней половинах пластины смещение U_x 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_x имеет противоположные знаки, а смещение U_z – одинаковые.

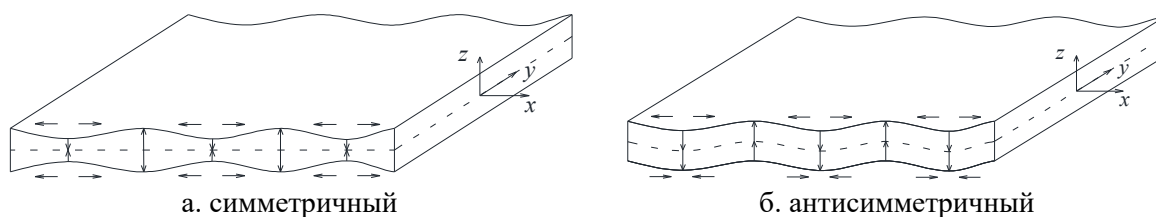


Рис. 1. Волны Лэмба

Согласно [18] уравнения распространения упругих волн через скалярный ϕ и векторный потенциал ψ в однородной плите имеет вид:

$$\Delta\phi + k_l^2\phi = 0; \Delta\psi + k_t^2\psi = 0 \quad (1)$$

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 (1) может быть представлено в таком виде:

$$\begin{aligned} \phi &= A \exp(-qz + i(kx - \omega t)); \\ \psi &= B \exp(-sz + i(kx - \omega t)) \end{aligned} \quad (2)$$

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

Анализируя выражения (2) 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 [19-22], полученного Лэмбом:

$$\frac{\text{th}\beta_1 H / 2}{\text{th}\beta_2 H / 2} = \frac{4\beta_1\beta_2}{\eta^2\xi^2} \quad (3)$$

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.

Используя соотношения между упругими константами Ламе, динамическим модулем упругости E_d и коэффициентом Пуассона μ_d , получены выражения основных скоростей распространения упругих волн.

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\mu_d)}{\rho(1+\mu_d)(1-2\mu_d)}} \quad (4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1+\mu_d)}} \quad (5)$$

Основными типами волн, распространяющимися в строительных конструкциях, являются объемные (продольные и поперечные), а также каналовые (стержневые, пластинчатые, поверхностные и изгибные). 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):

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} \quad (6)$$

$$\frac{V_R}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} \cdot \frac{0,87+1,12\mu}{1+\mu} \quad (7)$$

$$\frac{V_R}{V_s} = \frac{0,87+1,12\mu}{1+\mu} \quad (8)$$

$$\frac{V_d}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{1-\mu}}(1+\mu) \quad (9)$$

$$\frac{V_{пл}}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{(1-\mu)^2}} \quad (10)$$

где V_p – скорость продольной волны; V_s – скорость поперечной волны; V_R – скорость рэлеевской волны; V_d – скорость стержневой волны; $V_{пл}$ – скорость пластинчатой волны; μ – коэффициент Пуассона.

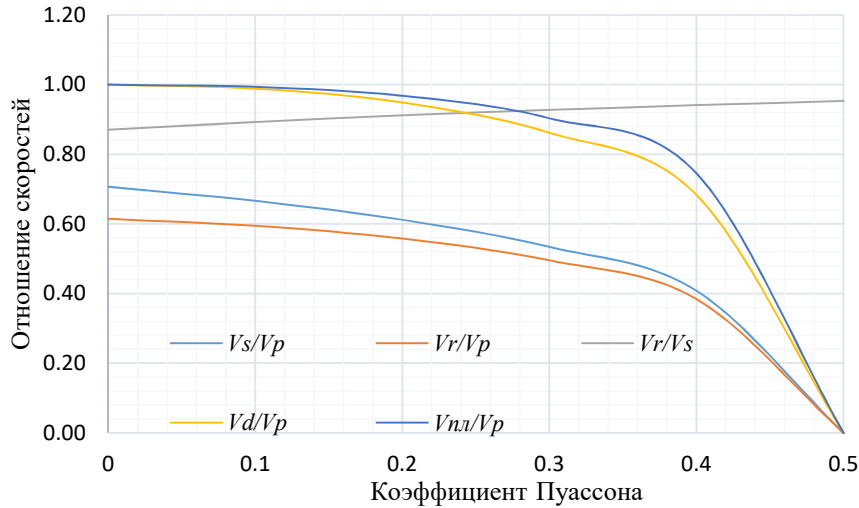


Рис. 2. Теоретические зависимости отношения скоростей от коэффициента Пуассона

Из уравнений (3, 6, 7, 8) следует, что зависимость между безразмерными параметрами $\frac{V_u}{V_R}$ и $\frac{\lambda}{H}$ может быть выражено как:

$$(3) \Leftrightarrow \frac{th\left(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1-\frac{V_u^2}{V_p^2}}\right)}{th\left(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1-\frac{V_u^2}{V_s^2}}\right)} = \frac{4\sqrt{\left(1-\frac{V_u^2}{V_p^2}\right)\left(1-\frac{V_u^2}{V_s^2}\right)}}{\left(2-\frac{V_u^2}{V_s^2}\right)^2} \quad (11)$$

\Leftrightarrow

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

По уравнению (10) легко 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

$= V_R$. Из теоретических формул упругости после преобразования уравнения (10) получаем:

$$(p-1)\alpha^{g+h} - (p+1)\alpha^g + (p+1)\alpha^h - (p-1) = 0 \quad (13)$$

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

λ_B - Длина волны; V_R – скорость Рэлеевской волны; μ – коэффициент Пуассона.

Конечное решение из уравнения (13) представляет собой теоретическую зависимость между скоростью изгибной волны и ее длиной, которую можно использовать для решений следующих задач:

- Определение жесткостных характеристик строительных материалов
- Контроль качества, выявление дефектов и повреждений конструкций

- Определение прочности бетона и каменной кладки
- Определение толщины плиты, стены и фундаментных стен

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

выполняют на слоях плиты, имеющих разные физико-механические свойства по толщине или ограниченные размеры. Из уравнения (13) видно, что волна распространяется со скоростью, которая зависит от ее длины, а также от толщины и упругих свойств плит.

Для различных значений коэффициента Пуассона при решении уравнения (13) получено множество значений λ/H и соответствующих значений V_w/V_R , которые приведены на рис. 3.

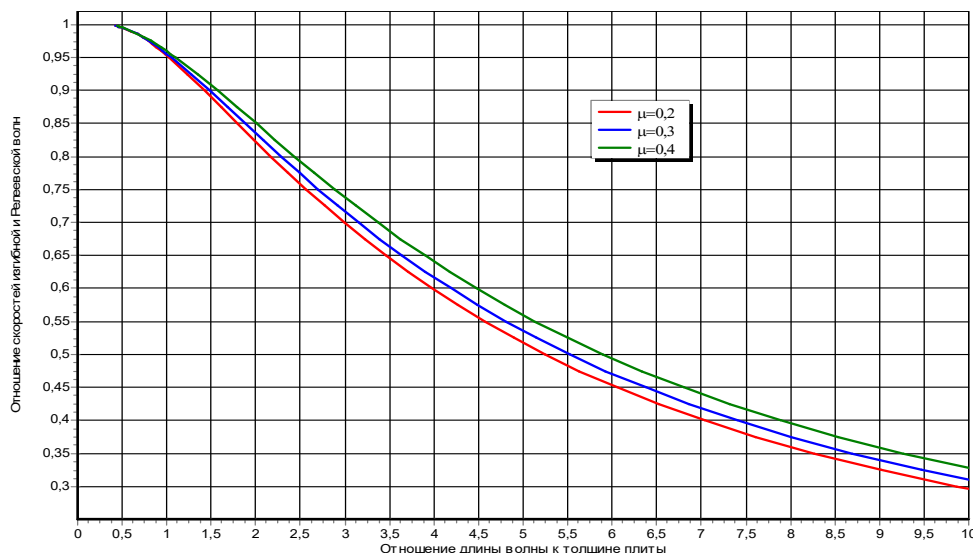


Рис. 3. Графики дисперсионных кривых при различных значениях коэффициента Пуассона

В любом случае предполагается, что динамический коэффициент Пуассона плиты и стены известен. Ошибки в определении скорости продольной волны, 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 4.

По уравнению (13) также можно решить обратную задачу для определения толщин

конструкций пластинчатого типа. Результаты теоретических дисперсионных кривых для бетона при различных толщинах плит показан на рисунке 5.

Джонсом было доказано [23, 24], 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 рис. 3, 4 в случае $\mu = 0,25$:

$$\frac{V_R}{V_w} = 0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H} \quad (14)$$

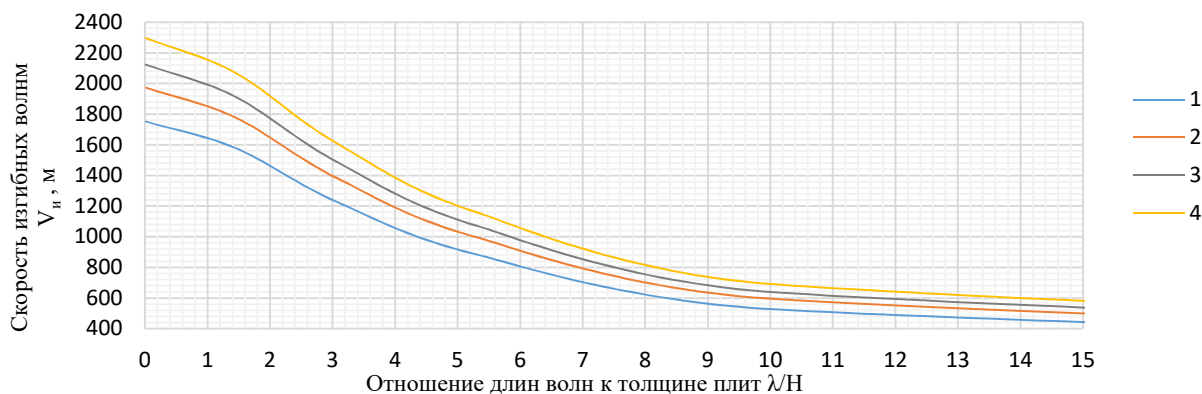


Рис. 4. Дисперсионные кривые для бетона различных прочностей (1 – $E_d = 22000$ МПа, 2 – $E_d = 27500$ МПа, 3 – $E_d = 32000$ МПа, 4 – $E_d = 37500$ МПа)

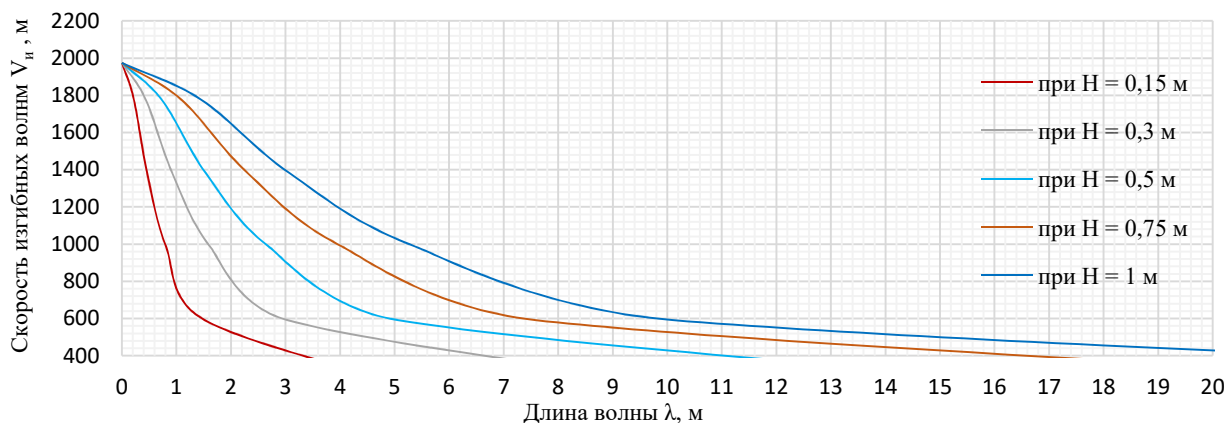


Рис. 5. Дисперсионные кривые для бетона с $E_d = 27500$ МПа (при различных толщинах плит)

А среднее значение скорости рэлеевской волны определяется по формуле

$$\bar{V}_R = \frac{b-a}{k} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k V_n^i}{\int_a^b \frac{1}{0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H}} d\left(\frac{\lambda}{H}\right)} = 0,26 \cdot \frac{b-a}{k} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k V_n^i}{\ln\left(0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H}\right) \Big|_a^b} \quad (15)$$

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 $0,4$

Тогда динамический модуль упругости вычисляют по формуле:

$$\bar{E}_d = 2,95\rho\bar{V}_R^2 \quad (16)$$

Особенности распространения упругих волн в кладке

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

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. [25, 26]. Сравнительно простым является уравнение для распространения колебаний продольных волн перпендикулярно слоям [24]:

$$\cos \frac{2\pi f}{V_f} (h_1 + h_2) - \cos 2\pi\beta \cos 2\pi\beta qm + D \sin 2\pi\beta \sin 2\pi\beta qm = 0 \quad (17)$$

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 представлено в таком виде:

$$V_f = \frac{2\pi f h_1 (1+m)}{\arccos(\cos 2\pi\beta \cos 2\pi\beta qm - D \sin 2\pi\beta \sin 2\pi\beta qm)} \quad (18)$$

Из которого 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:

$$\alpha = \frac{V_\infty}{V_o} = \sqrt{1 + \frac{2qm(D-1)}{(1+qm)^2}} \quad (19)$$

Принимаем $\rho_1/\rho_2 = 1$ то зависимость V_∞/V_o от V_2/V_1 для различных h_2/h_1 представлена на рисунке 6:

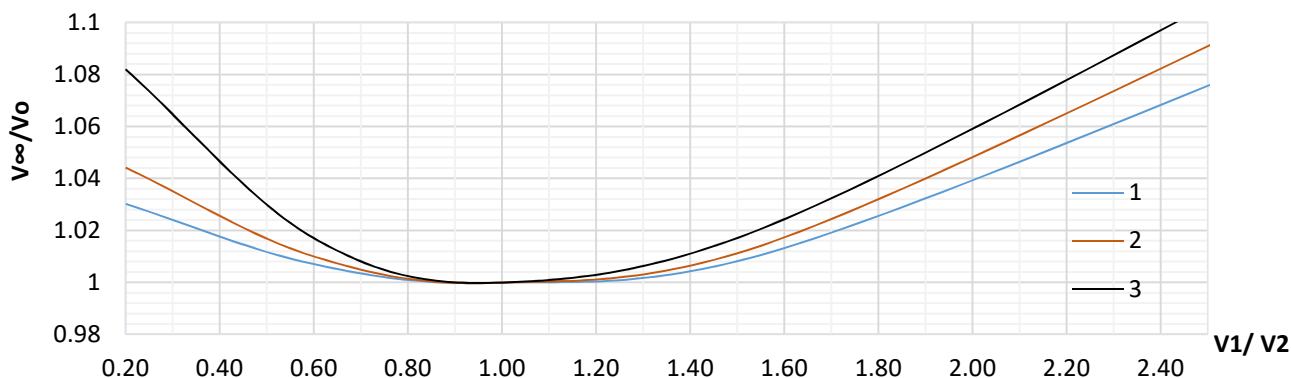


Рис. 6. Зависимость V_{∞}/V_0 от V_1/V_2 для различных h_2/h_1 при $\rho_1/\rho_2 = 1$ (1 - $h_2/h_1=0,1$; 2 - $h_2/h_1=0,2$; 3 - $h_2/h_1=0,3$)

На рисунке видно, что чем ближе отношение V_{∞}/V_0 к единице, тем более однородной является конструкция. При рассмотрении отношения V_f/V_0 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.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Суть разработанной нами методики заключается в возбуждении ударом широкого спектра изгибных волн и измерении параметров их распространения с помощью датчиков, образующих

измерительный луч, в котором все точки измерения с постоянным шагом располагаются на одной прямой с точкой удара. Схема экспериментальных исследований была проведена на рисунке 7.

Полученные реализации (см. рис. 8) фильтруются полосовыми фильтрами для разделения на отдельные пучки монохроматических волн и для каждого пучка строятся годографы распространения волны (рис. 9), по которым определяются скорость и длина волны. Результаты обработки используются для построения дисперсионных кривых и, при необходимости, годографов скорости поверхностных волн.

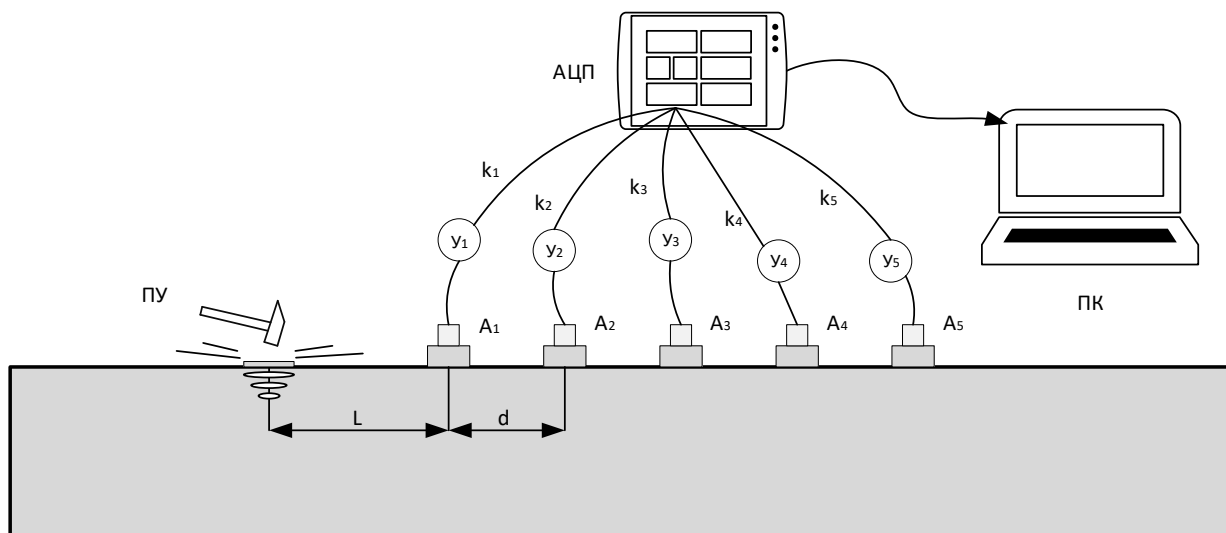


Рис. 7. Схема проведения эксперимента

A_1-A_5 – акселерометры; ПУ - точки приложения ударов; k_1-k_5 – antivibrational cables; $У_1-У_5$ – согласующие усилители; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер

Предложенный метод позволяет проводить обследование строительных конструкций, в том числе с переменными по глубине конструкции физико-механическими характеристиками их материалов.

Некоторые результаты обследования с использованием поверхностных волн приведены

ниже. На рис. 10–12 приведены дисперсионные кривые, полученные в массиве железобетона толщиной 1,7 м для различных характеристик состояния бетона по толщине конструкции. Там же приведены теоретические дисперсионные кривые поверхностных волн для однородной по толщине плиты (сплошные линии).

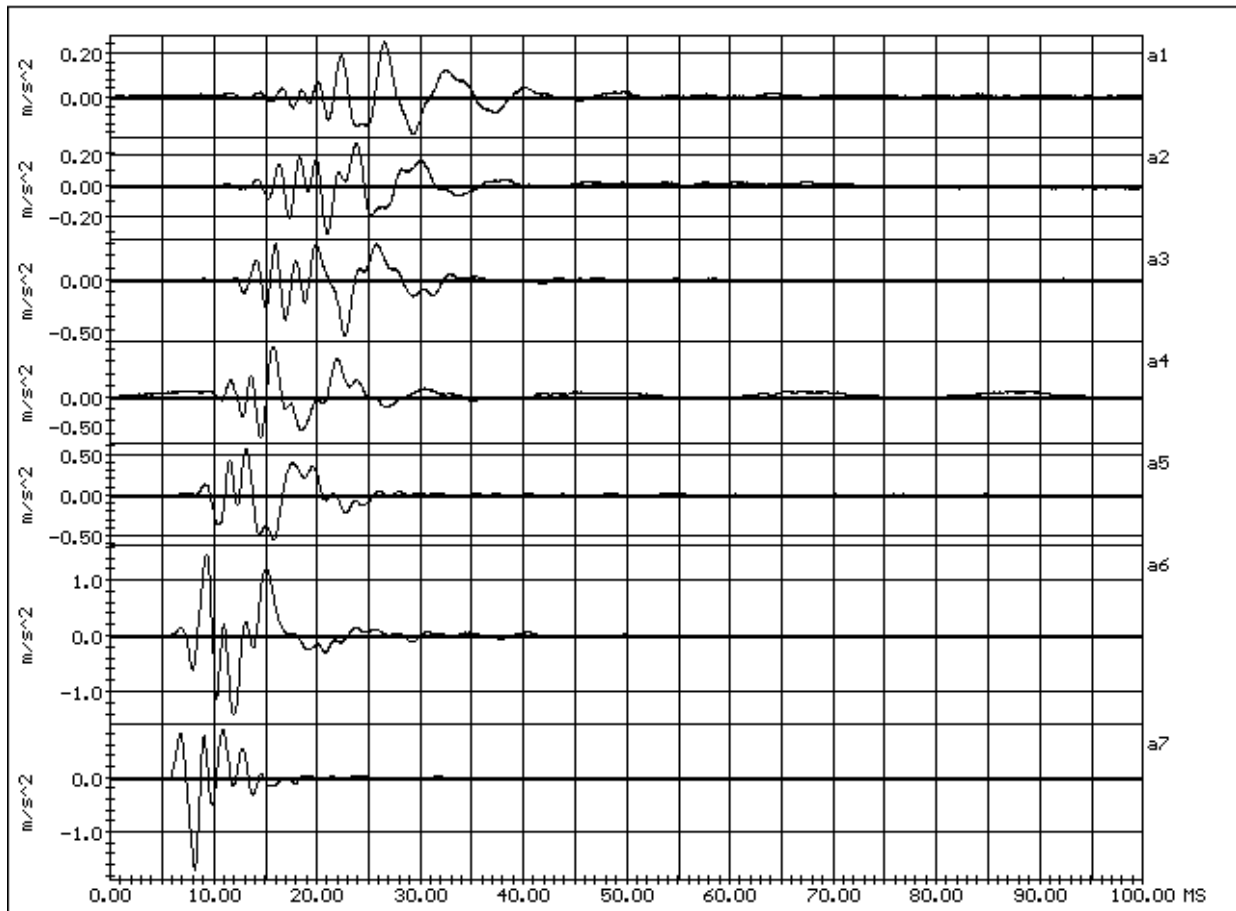


Рис. 8. Пример исходных реализаций (по вертикальной оси справа обозначены номера датчиков, слева – ускорения в m/s^2 . По горизонтальной оси отложено время в микросекундах)

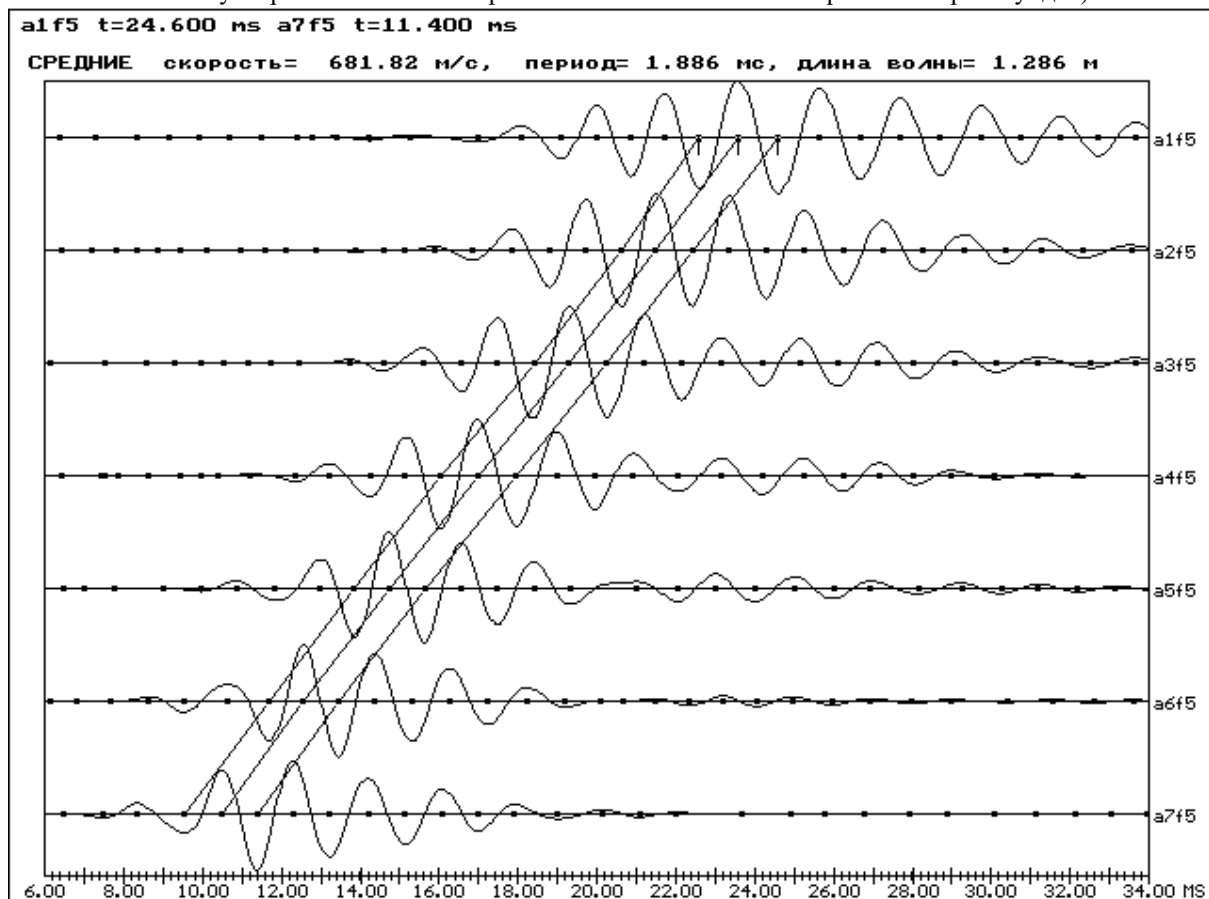


Рис. 9. Пример пучка монохроматических волн с годографами распространения волн

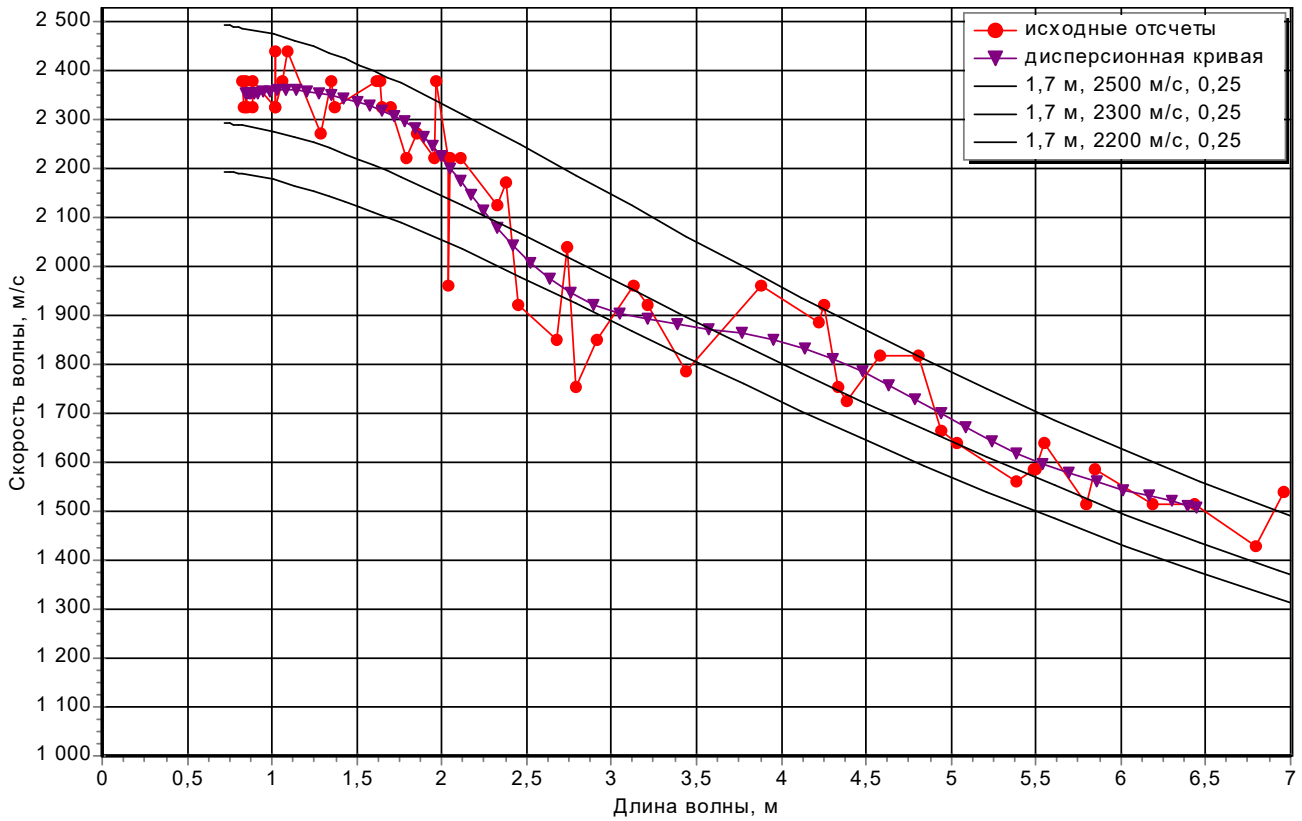


Рис. 10. Дисперсионная кривая для массива с постоянными по толщине конструкции характеристиками бетона

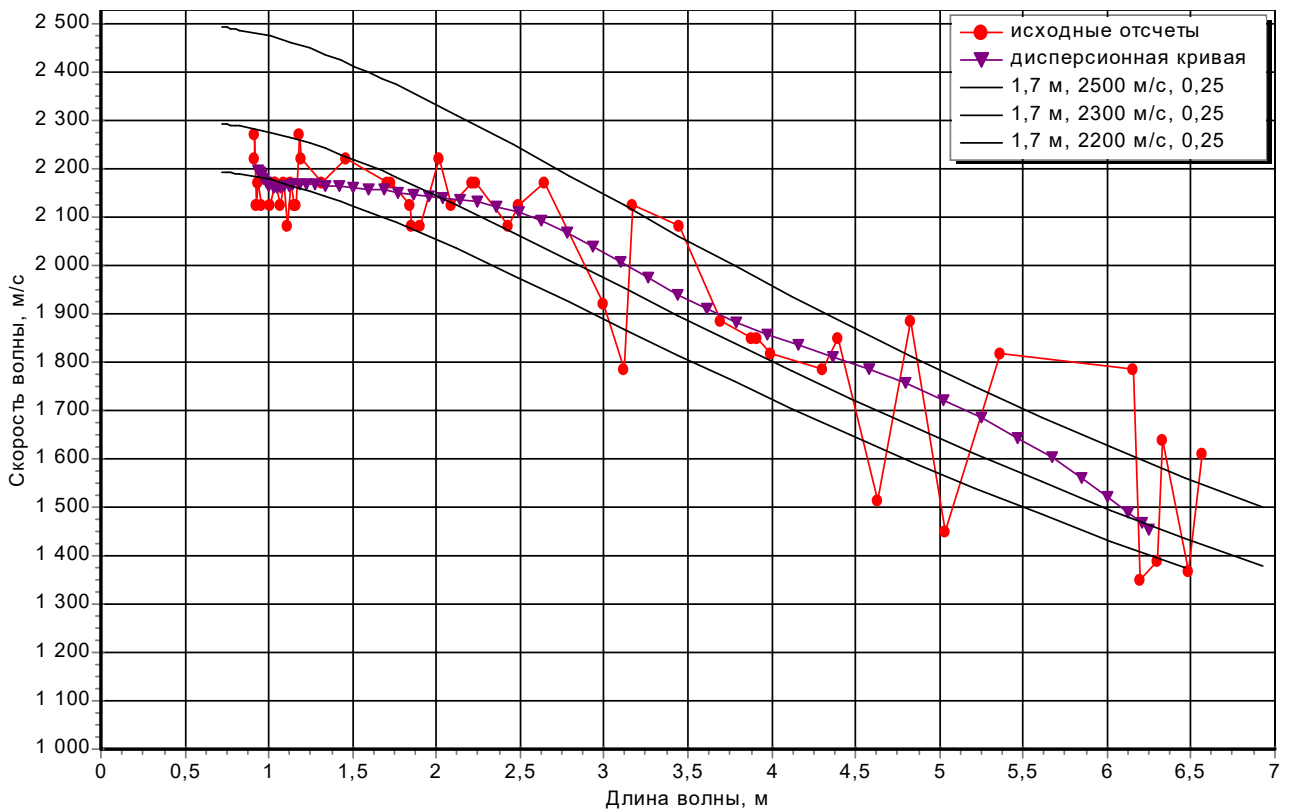


Рис. 11. Дисперсионная кривая массива с ослабленным поверхностным слоем бетона

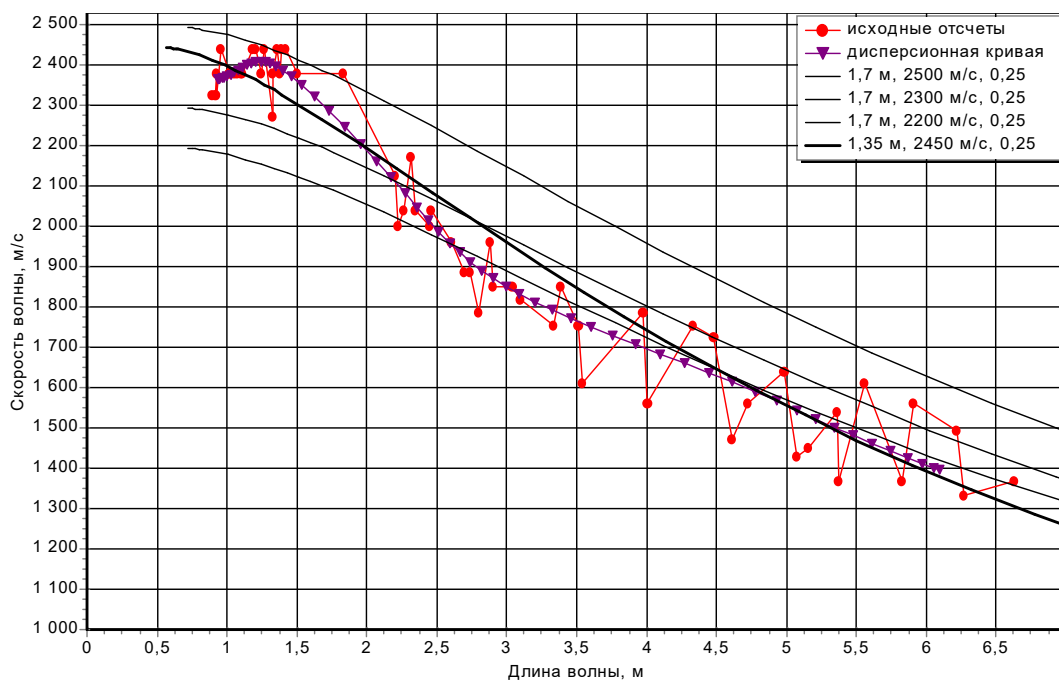


Рис. 12. Дисперсионная кривая для массива с ослабленным слоем бетона в глубине массива

Таким образом, с использованием поверхностных волн можно не только оценивать состояние массива в целом, но для толстостенных конструкций также оценивать состояние отдельных слоев.

Метод изгибной волны используется для оценки состояния материала в строительных конструкциях, в том числе толстостенных, при наличии доступа только к одной поверхности конструкции. Для кирпичной кладки и бетона имеются зависимости прочности от скорости продольной волны, по которым может определяться осевая прочность материалов строительных конструкций.

Проверка проектной толщины и определение жесткостных характеристик кирпичной кладки стен существующего здания на Каменно-островском проспекте д. 61 выполнялись в соответствии со схемой инструментального обследования, приведенной на Рисунке 7. А схема проведения испытаний с измерительным комплексом представлена на рисунке 13, результаты дисперсионных кривых распространения изгибных волн в кладке в зависимости от их длин показаны на рисунке 14.



Рис. 13. Схема проведения испытаний с измерительным комплексом

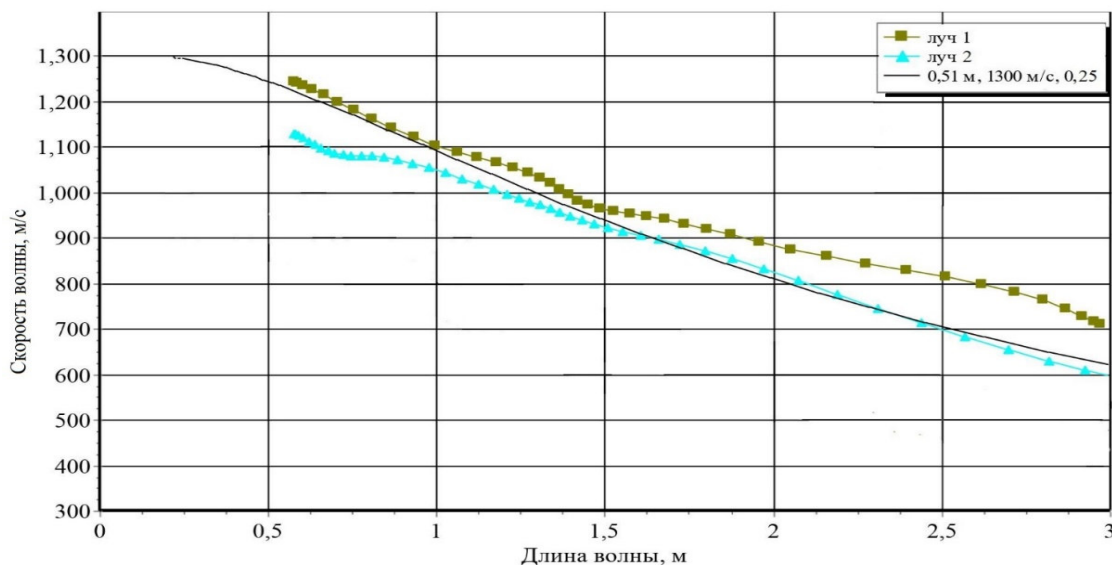


Рис. 14. Дисперсионные кривые изгибных волн в кладке

По результатам зондирования построены дисперсионные кривые и определены скорости распространения рэлеевской волны V_R . По скорости рэлеевской волны в материале стен, исполь-

зуя 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. 1.

Таблица 1

Оценка проектной толщины и жесткостных характеристик кладки стен зданий

Обслед. здание	Дисперс. кривые	V_R , м/с	Факт. толщина, м	E_d , МПа	λ , м	Толщина, м	Сред. значение	Погрешность	\bar{V}_R , м/с	\bar{E}_d , МПа	Погрешность
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 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. 6). 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 1 показана разница динамических модулей упругости общей толщины и поверхностных. Она составляет 16,5 %.

Выводы

Разработан метод зондирования плитных и стеновых конструкций, основанный на теории Лэмба в приложении к изгибным волнам. Пред-

ставлена формула определения скоростей распространения поверхностной рэлеевской волны. Отсюда определены жесткостные характеристики по корреляционным зависимостям между ними и скоростью распространения продольной волны. Предлагаемый метод позволил решить проблему зондирования конструкций при интенсивном рассеянии энергии упругих волн в материале, в том числе, и при одностороннем доступе. По построенным дисперсионным кривым (зависимости скоростей распространения изгибных волн от их длины) предложенный метод позволяет оценить наличие дефектов, повреждений, их размеры и ориентировочное положение. Метод рекомендуется использовать также для контроля проектной толщины плитных, стеновых и фундаментных конструкций, а также для отделки подземных сооружений.

Благодарности. «Автор выражает благодарность профессору Савину Сергею Николаевичу за полезные замечания и важнейшие советы

при проведении исследования и оформления данной статьи. Также хочу поблагодарить коллегам 23 ГМПИ г. Санкт-Петербурга. Данная работа выполнена при его поддержке».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Давидюк А.А. Анализ результатов обследования многослойных наружных стен многоэтажных каркасных зданий // Жилищное строительство. 2010. № 6. С. 21–26.
2. Новикова С. Аналіз результатів обстеження зовнішніх багатошарових стін з облицюванням цеглою // Будівельні матеріали та виробы. 2018. 5-6(99). 106–108. <https://doi.org/10.48076/2413-9890.2018-99-14>.
3. Улыбин А.В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений // Magazine of Civil Engineering. 2011. № 4. С. 10–15.
4. Добромыслов А.Н. Диагностика поврежденных зданий и инженерных сооружений. М.: МГСУ; АСВ, 2006. 256 с.
5. Землянский А.А. Обследование и испытание зданий и сооружений. М.: АСВ, 2004. 240 с.
6. Козачек В.Г., Нечаев Н.В., Нотенко С.Н., Римшин В.И., Ройтман А.Г. Обследование и испытание зданий и сооружений. М.: Высшая школа, 2004. 447 с.
7. Каневский И.Н., Сальникова Е.Н. Неразрушающие методы контроля. Владивосток: Изд-во ДВГТУ. 2007. 243 с.
8. Букин А.В., Патраков А.Н. Определение прочности бетона методами разрушающего и неразрушающего контроля // Construction and Geotechnics. 2010. №1. 89–94.
9. Савин С.Н., Данилов И.Л. Сейсмобезопасность зданий и сооружений. СПб.: Лань, 2021. 200 с.
10. Marazzani J., Cavalagli N., Gusella V. Elastic Properties Estimation of Masonry Walls through the Propagation of Elastic Waves: An Experimental Investigation // Appl. Sci. 2021. 11. 9091. DOI: 10.3390/app11199091
11. Savin S., Tsakalidis V. 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 // COMPDYN 2015 - 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. 2015. 5. Pp. 706–720.
12. Фан Ч.Д., Савин Д.А. Метод определения жесткостных характеристик строительных конструкций с использованием изгибных волн // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 3 (92). 28–34.
13. Фан Ч.Д. Определение прочности каменных конструкций методом с использованием скоростей изгибных акустических волн // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 6 (95). 21–29.
14. Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий. М.: ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 1988. 57 с.
15. Гринченко В.Т., Мелешко В.В. Гармонические колебания и волны в упругих телах. Киев: Наукова думка, 1981. 284 с.
16. Vahid T., Sourav B. Generalized Analytical Dispersion Equations for Guided Rayleigh-Lamb waves and Shear Horizontal (SH) waves in Corrugated Waveguides // International Journal of Solids and Structures. 2020. 202. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2020.05.026
17. Achenbach J.D. Wave propagation in elastic solids. Amsterdam; London: North-Holland Publishing Co, 1973. 430 с.
18. Viktorov I. Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications: Springer Science+Business Media: New York, NY, USA, 1967. 154 p.
19. Савин С.Н. Использование упругих колебаний различных длин волн для оценки динамических параметров зданий и сооружений и прочности каменной кладки // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 4. С. 43–54.
20. Ильяшенко А.В., Кузнецов С.В. Теоретические аспекты применения волн Лэмба в неразрушающей диагностике слоистых анизотропных сред // Дефектоскопия. 2017. № 4. С. 3–21.
21. Šofer M., Ferfecki P., Šofer P. Numerical solution of Rayleigh-Lamb frequency equation for real, imaginary and complex wavenumbers // Matec web conf. 2018. Vol. 157. DOI:10.1051/matec-conf/201815708011
22. Lu C., Hua J., Wang Z., Lin J. Detection and localization of closely distributed damages via lamb wave sparse reconstruction // Vibroengineering PROCEDIA. 2017. Vol. 14. Pp. 115–119. DOI: 10.21595/vp.2017.19222.
23. Джонс Р., Фэжзоару И. Неразрушающие методы испытаний бетонов / пер. с рум. В. М. Маслобойщикова. М.: Стройиздат. 1974. 296 с.
24. Алешин Н.Н. Электросейсмоакустические методы обследования зданий. М.: Стройиздат. 1982. 156 с.
25. Рытов С.М. Акустические свойства мелкослоистой среды // Акуст. Журн. 1964. Т.10, №1. С. 16–18.
26. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. 2-е изд. М.: Наука. 1973. 343 с.

Информация об авторах

Фан Чунг Дык, аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций. E-mail: phanchungduc@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. 13 Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 20.11.2023 г.

© Фан Ч.Д., 2023

Phan Ch.D.

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: phanchungduc@gmail.com

APPLICATION OF THE BENDING WAVE METHOD FOR INSPECTION OF SLAB AND WALL STRUCTURES

Abstract. *The paper considers the possibility of estimating the stiffness and strength characteristics of slab and wall structures by thickness based on the results of experimental studies of measurements of bending wave propagation velocities of different frequency ranges. Theoretical dispersion curves of bending wave velocities as a function of their lengths for plate structures of different characteristics at different thicknesses are constructed. Comparison of theoretical and experimental results for estimation of the state of materials by the thickness of slabs has been carried out. Experimental measurements of bending wave propagation velocities on the walls of an existing building in St. Petersburg have been carried out, and the primary assessment of masonry stiffness properties and control of the design wall thickness have been performed. The results of the studies confirmed the possibility of assessing the characteristic of the state of materials in the thickness of slab and wall structures by comparing experimental studies of bending wave propagation velocity measurements at different frequency ranges. The use of bending wave method also allows controlling the design thickness of slab, wall and lining at one-sided access.*

Keywords: *bending wave velocity, stiffness characteristics, plate thickness, experimental studies, different frequency ranges*

REFERENCES

1. Davidyuk A.A. Analysis of the results of inspection of multilayer external walls of multistory frame buildings [Analiz rezul'tatov obsledovaniya mnogoslojnyh naruzhnyh sten mnogoetazhnyh karkasnyh zdaniy]. Housing construction. 2010. No. 6. Pp. 21–26. (rus)
2. Novikova S. analysis of the results of the survey of external multilayer walls with brick cladding. Building materials and products. 2018. (5-6(99)). 106–108. <https://doi.org/10.48076/2413-9890.2018-99-14>.
3. Ulybin A.V. On the choice of methods of concrete strength control of constructed structures. Magazine of Civil Engineering [O vybore metodov kontrolya prochnosti betona postroennyh sooruzhenij]. 2011. No. 4. Pp. 10–15. (rus)
4. Dobromyslov, A. N. Diagnosis of damage to buildings and engineering structures [Diagnostika povrezhdenij zdaniy i inzhenernyh sooruzhenij]. Moscow, MGSU: ASV Publ., 2006. 256 p. (rus)
5. Zemlyansky A.A. Survey and testing of buildings and structures [Obsledovanie i ispytanie zdaniy i sooruzhenij]. A. A. Zemlyansky. Moscow, ASV Publ., 2004. 240 p. (rus)
6. Kozachek V.G., Nechaev N.V., Notenko S.N., Rimshin V.I., Roitman A.G. Inspection and testing of buildings and structures [Obsledovanie i ispytanie zdaniy i sooruzhenij]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2004. 447 p. (rus)
7. Kanevskiy I.N., Salnikova E. N. N. Nondestructive methods of control [Nerazrushayushchie metody kontrolya]. Vladivostok: FESTU Publ. 2007. 243 p. (rus)
8. Bukin A.V., Patrakov A.N. Determination of concrete strength by methods of destructive and non-destructive testing [Opredelenie prochnosti betona metodami razrushayushchego i nerazrushayushchego kontrolya]. Construction and Geotechnics. 2010. No. 1. Pp. 89–94. (rus)
9. Savin S.N., Danilov I.L. Seismic safety of buildings and structures [Sejsmobeзопасnost' zdaniy i sooruzhenij]. St. Petersburg: Lan' Publ., 2021. 200 p. (rus)
10. Marazzani J., Cavalagli N., Gusella V. Elastic Properties Estimation of Masonry Walls through the Propagation of Elastic Waves: An Experimental Investigation. Appl. Sci. 2021. 11. 9091. DOI:10.3390/app11199091
11. Savin S., Tsakalidis V. 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. COMPDYN 2015 - 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. 5. 2015. Pp. 706–720.

12. Fan Ch.D., Savin D.A. Method for assessing the rigidity characteristics of building structures using flexural waves [Metod opredeleniya zhestkostnykh karakteristik stroitel'nykh konstrukcij s ispol'zovaniem izgibnykh voln]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2022. No. 3 (92). Pp. 28–34. (rus)

13. Fan Ch.D. Assessing of the stone structure strength by the method of using flexural acoustic waves` velocities [Opredelenie prochnosti kamennykh konstrukcij metodom s ispol'zovaniem skorostej izgibnykh akusticheskikh voln]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2022. No. 6 (95). Pp. 21–29. (rus)

14. Recommendations for the survey and assessment of the technical condition of large-panel and stone buildings [Rekomendacii po obsledovaniyu i ocenke tekhnicheskogo sostoyaniya krupnopanel'nykh i kamennykh zdaniy]. Moscow: TSNIISK named after V. A. Kucherenko, 1988. 57 p. (rus)

15. Grinchenko V.T., Meleshko V.V. Harmonic oscillations and waves in elastic bodies [Garmonicheskie kolebaniya i volny v uprugih telah]. Kiev: Naukova dumka, 1981. 284 p. (rus)

16. Vahid T., Sourav B. Generalized Analytical Dispersion Equations for Guided Rayleigh-Lamb waves and Shear Horizontal (SH) waves in Corrugated Waveguides. International Journal of Solids and Structures. 2020. 202. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2020.05.026

17. Achenbach J.D. Wave propagation in elastic solids. Amsterdam; London: North-Holland PublCo, 1973. 430 p.

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

19. Savin S.N. The use of elastic oscillations of various wavelengths to assess the dynamic parameters of buildings and structures and the strength of

Information about the authors
Phan Ch.D. PhD. E-mail: phanchungduc@gmail.com. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4

Received 20.11.2023

Для цитирования:

Фан Ч.Д. Применение метода с использованием изгибных волн для обследования плитных и стеновых конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 41–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-41-53

For citation:

Phan Ch.D. Application of the bending wave method for inspection of slab and wall structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 12. Pp. 41–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-41-53

masonry [Ispol'zovanie uprugih kolebanij razlichnykh dlin voln dlya ocnki dinamicheskikh parametrov zdaniy i sooruzhenij i prochnosti kamenoj kladki]. Seismic-resistant construction. Building safety. 2017. No. 4. Pp. 43–54. (rus)

20. Ilyashenko A.V., Kuznetsov S.V. Theoretical aspects of the application of Lamb waves in non-destructive diagnostics of layered an isotropic media [Teoreticheskie aspekty primeneniya voln Lemba v nerazrushayushchej diagnostike sloistyh anizotropnykh sred]. Defectoscopy. 2017. No. 4. Pp. 3–21. (rus)

21. Šofer M., Ferfecki P., Šofer P. Numerical solution of Rayleigh-Lamb frequency equation for real, imaginary and complex wavenumbers. Matec web conf. 2018. Vol. 157. DOI:10.1051/matecconf/201815708011

22. Lu C., Hua J., Wang Z., Lin J. Detection and localization of closely distributed damages via lamb wave sparse reconstruction. Vibroengineering PROCEDIA. 2017. Vol. 14. Pp. 115–119. DOI: 10.21595/vp.2017.19222.

23. Jones R., Facoaru I. Non-destructive methods of testing concretes [Nerazrushayushchie metody ispytaniy betonov]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974. 296 p. (rus)

24. Aleshin N.N. Electroseismo-acoustic methods for surveying buildings [Elektrosejsmoakusticheskie metody obsledovaniya zdaniy]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 156 p. (rus)

25. Rytov S.M. Acoustic properties of a finely layered medium [Akusticheskie svoystva melkosloistoj sredy]. Acoustic. Journal. 1964. Vol.10, No. 1. Pp. 16–18. (rus)

26. Brekhovskikh L.M. Waves in Layered Media [Volny v sloistyh sredah]. 2nd ed. M.: Science. 1973. 343 p. (rus)