

метода профилирования с оценкой дифференциального значения скорости.

Подтверждена метрологическая эффективность использования дифференциального значения скорости распространения ультразвукового импульса при использовании метода поверхностного профилирования бетона. Использование этого показателя ультразвукового метода позволяет снизить влияние поверхностного слоя бетона при оценке скорости распространения ультразвука и приблизить этот показатель к значению скорости для сквозного прозвучивания.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624-2012. – Введ. (в РБ) 01.01.2016. – М.: 2014. – 16 с.

2. Ковалев, А.В. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Поверхности и пространственная селекция / А.В. Ковалев, В.Н. Козлов, А.А. Самокрутов // Дефектоскопия. – 1990. - № 2. - С. 29-41.

3. Методы контроля бетона в конструкциях: СТБ EN 12504-4-2014, Часть 4. Определение скорости распространения ультразвукового импульса – Введ. 01.01.2015. Госстандарт, Минск, 2014. – 15 с.

4. Снежков, Д.Ю. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович - Минск: БНТУ, 2016. - 330 с.

УДК 620.179.1

### **СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИМПУЛЬСА И АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН МЕТОДА СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ**

*СНЕЖКОВ Д. Ю., КОНДРАТЕНКО А. А., ПОТЕС Т. А.*

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Одна из основных причин интереса к использованию акустических методов заключается в том, что свойства материалов, определяющие возбуждение и распространение механических колебаний, тесно связаны с их физико-механическими характеристиками.

Основными задачами методов акустического неразрушающего контроля в строительстве являются:

- выявление дефектов типа нарушения сплошности бетонных и железобетонных элементов конструкций;
- оценка физико-механических характеристик бетона – показателей прочности и упругости
- ориентировочная оценка геометрических параметров элементов конструкций при ограниченном доступе к ним

Из всего многообразия акустических методов неразрушающего контроля к настоящему времени в практике строительства практическое применение получили ультразвуковой импульсный метод по ГОСТ 17624-2012 [1] и EN 12504-4:2004 [5], метод ультразвуковой дефектоскопии, а также группа методов свободных колебаний - виброакустический метод и *Impact-Echo* метод (ИЕМ) [7]. Имеются отдельные примеры использования акустико-эмиссионного метода, в основном, - в системах автоматизированного мониторинга высотных и уникальных зданий. Ультразвуковому импульсному методу посвящено большое число публикаций [4,6], посвященных примерам его использования. Но, несмотря на это, существуют противоречивые мнения по его эффективности в строительной практике. В частности, СТБ 2264 [2], запрещает его использование без поддержки механическими методами испытаний.

Методы свободных колебаний используют в качестве информативных параметров спектральные характеристики затухающих свободных колебаний в массиве конструктивного элемента или всей конструкции. Колебания обычно инициируются ударом по поверхности испытываемого элемента. Данная группа методов представлена в отечественных публикациях лишь виброакустическим методом, применяемым исключительно для диагностики железобетонных свай. Данные о практическом применении *Impact-Echo* метода (ИЕМ) в Республике Беларусь не обнаружены.

У метода свободных колебаний, областью, непосредственно вовлекаемой в процесс испытаний бетонной или железобетонной конструкции, является весь или большая часть массива конструкции, в отличие от других методов испытаний, где контролируется лишь локальная область изделия. Для сравнения можно указать, что для склерометрических методов испытаний бетона область испытания ограничена радиусом 2...3 см от точки нанесения удара по

поверхности бетона. Ультразвуковой импульсный метод имеет значительно больший охват бетонного массива. При поверхностном прозвучивании бетона типовыми приборами, область участвующая в распространении ультразвукового импульса значительно больше. В продольном направлении она ограничена базой измерения, составляющей обычно 120...150 мм. Поперечные размеры области контроля зависят от длины волны колебаний и от способа регистрации момента приема зондирующего акустического импульса. В простейшем случае, когда момент появления импульса определяется как момент превышения им минимального порогового значения (момент первого вступления импульса), указанные поперечные размеры области контроля составляют около половины длины волны колебаний. Для типичных ультразвуковых преобразователей с частотой собственных колебаний 50...100 кГц длина волны  $\lambda$  в бетоне составляет

$$\lambda = \frac{V}{f_{us}} \approx \frac{4000}{50000} = 8, \text{ см.}$$

Соответственно полуволновая область составит 40 x 40 мм. Приведенные габариты области контроля в значительной мере нивелирует влияние структурной неоднородности бетона на косвенные показатели метода, что является его сильной стороной. Но даже и такой объем составляет лишь малую часть от бетонного массива конструкции.

В данной статье представлены результаты измерения скорости распространения акустических волн в компактных бетонных элементах методом свободных колебаний, в сопоставлении с данными её измерений ультразвуковым импульсным методом.

#### *Метод свободных колебаний*

Метод свободных колебаний, независимо от его конкретной технической реализации, основан на анализе частотного спектра свободных колебаний, возбуждаемых в контролируемом изделии. Основные параметры – характеристические частоты спектра колебаний, показатели затухания колебаний. Путем кратковременного внешнего воздействия на элемент конструкции, например, ударом, возбуждают свободные колебания, в результате чего в контролируемом элементе возникнут свободные (собственные) затухающие колебания. На рис. 1 приведена временная диаграмма акустического

сигнала полученного на фундаментном блоке габаритами 237x58x58 мм на его большой боковой грани. При заданных размерах и форме изделия, однородности материала, из которого оно изготовлено, частоты собственных колебаний являются величинами постоянными, обусловленными процессами образования стоячих волн. При изменении размеров элемента, наличии дефекта или изменении показателей упругости и плотности бетона параметры колебательной системы меняются, что ведет к изменению частотного спектра колебаний.

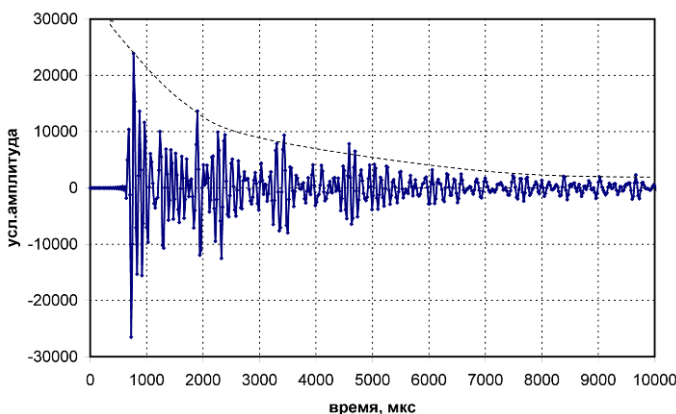


Рис. 1. Временная диаграмма акустического сигнала в точке 5; ударное возбуждение в точке 4 (см. рис. 4)

Дополнительными информационными параметрами может служить декремент затухания колебаний, а также - временные интервалы следования «пакетов» волн (см. рис. 1)

#### *Методическая основа системы анализа свободных колебаний*

Один и тот же акустический сигнал может рассматриваться как функция времени, так и как функция обратной времени величины – частоты. Пример сигнала во временной области представлен на рис. 1. Временное представление удобно в случаях, когда длительность импульса возбуждения значительно меньше времени пробега этого импульса до момента отражения от противоположной грани контролируемого элемента. Поэтому временное представление акустического сигнала используется обычно для контроля протяженных изделий: балок, свай. Для контроля компактных изделий, габаритов

риты которых составляют 1..3 метра, обнаружить полезный отраженный импульс волны затруднительно: на прием одновременно попадают два акустических сигнала – один отраженный от дальней грани элемента, второй – незавершившийся импульс возбуждения. В этом случае для анализа динамических процессов широко используются спектральные методы, позволяющие рассматривать процесс не во временной области развития, а в частотной. В основе спектральных методов лежит преобразование Фурье (ПФ)

$$F(\omega) = \int f(t) \cdot \exp(-i\omega t) dt, \quad (1)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int F(\omega) \cdot \exp(-i\omega t) d\omega, \quad (2)$$

где  $F(\omega)$  – преобразование Фурье (частотный спектр);  
 $f(t)$  - исходный сигнал во временном представлении;  
 $\omega$  – круговая частота.

Выражение (1) – прямое преобразование Фурье, выражение (2) – обратное преобразование. Математический смысл преобразования Фурье состоит в представлении сигнала  $f(t)$  в виде бесконечной суммы синусоид и косинусоид. На рис. 2 приведен частотный спектр, полученный на фундаментном блоке (см. рис. 3) при установке акустического датчика в точке 3 и возбуждении колебаний ударом в точке 1.

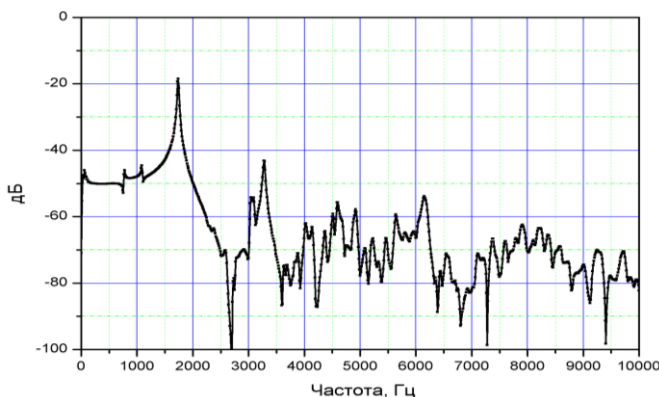


Рис. 2 Частотный спектр акустического сигнала в точке 3; ударное возбуждение в точке 1 (масштаб шкалы амплитуд логарифмический)

Поскольку амплитуда спектральных составляющих может отличаться на несколько порядков, распространенной практикой является представление шкалы амплитуд частотного спектра в логарифмическом масштабе.

Как указывалось выше, свободные колебания элемента обусловлены стоячими волнами в его массиве. Поскольку типов волн в элементе ограниченных размеров может сформироваться большое количество: продольные, сдвиговые (поперечные), поверхностные, волны Лэмба и Порхгаммера. Соответственным будет и количество типов стоячих волн. Указанные стоячие волны могут формироваться по всем трем размерным координатам элемента, трансформируясь одна в другую, в результате, частотный спектр акустического сигнала свободных колебаний приобретает большое количество составляющих. Частота для каждого типа стоячей волны определяется из условия

$$f_{n,i} = \frac{L_i}{k \cdot \lambda_n / 2}, \quad (3)$$

где  $L_i$  - размер элемента;  $\lambda_n$  - длина волны  $n$ -го типа.

Следует также иметь в виду, что кроме колебаний основной моды, могут формироваться так называемые гармоники, - колебания, частоты которых в целое число раз выше частоты основной моды. В формуле (3) частоты гармоник рассчитываются при  $k = 2, 3, 4, \dots$ . Спектральные пики 2-й и 3-й гармоник продольных колебаний для образца 400x100x100 мм отчетливо видны на рис. 13: частоты – 9000 Гц и 13500 Гц, основная частота (1-я гармоника) - ~ 4500 Гц.

Таким образом, частотный спектр собственных колебаний контролируемого элемента может содержать большое количество составляющих, что хорошо видно на рис. 3.

Для регистрации свободных колебаний бетонных элементов использовался прибор диагностики свай «Спектр-3» в штатной комплектации. Максимальная частота приемного тракта прибора «Спектр-3.0» - 23 кГц, что позволяет регистрировать акустические сигналы свободных колебаний элементов с габаритами порядка 0,5 м и более. Диапазон отображения частотного спектра прибора ограничен возможностями штатного программного обеспечения, и составляет 3 кГц, что недостаточно для отображения всего спектра

колебаний. Поэтому для обработки сигнала в диапазоне 0...23 кГц использовалась программа для обработки аудиофайлов Cool\_Edit\_Pro v\_2.0, а также – MS Excel и Origin\_Pro 7.0. Возбуждение колебаний осуществлялось штатным молотком прибора и стальным бойком-шаром, массой 8 г.

Определение скорости ультразвуковым импульсным методом производилось в помощью прибора «Пульсар-2.2». Оба прибора имеют стык USB для переноса данных в компьютер.

*Измерение скорости распространения ультразвукового импульса.*

На рис. 7 показана разметка точек установки ультразвуковых преобразователей и акселерометра прибора «Спектр-3» на фундаментном блоке

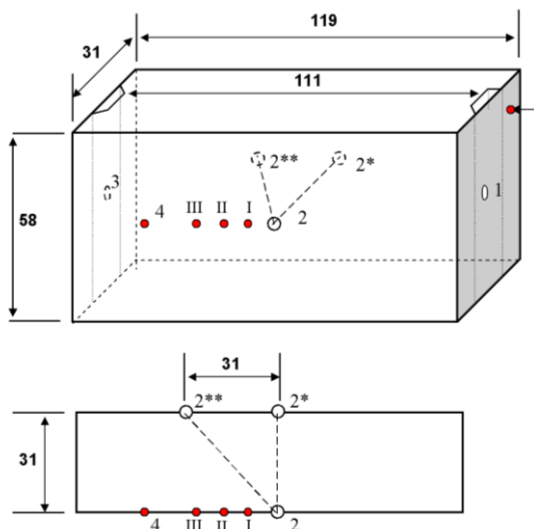


Рис. 3 Разметка позиций установки акселерометра и ультразвуковых ЭАП

Измерения выполнялись классическим методом сквозного прозвучивания – точки 2 и 2\*; методом диагонального прозвучивания - точки 2 и 2\*\*; методом поверхностного профилирования - точка 2 и точки I, II, III. Определение времени распространения ультразвукового импульса производилась по результатам обработки оцифрованного акустического сигнала средствами MS Excel.

Регистрация акустического сигнала для всех позиций установки преобразователей производилась дважды – при двух значениях коэффициента приемного тракта прибора «Пульсар-2.2»: 64 и 8192. Предварительно выполнялась калибровка прибора по штатной процедуре на калибровочном образце с эталонным временем пробега ультразвукового импульса 53,4 мкс. Этот же сигнал после оцифровки использовался для установления соответствия его временных параметров полученному отсчету времени на калибровочном образце.

Скорость акустической волны для метода свободных колебаний определялась по частотам спектральных составляющих. На рис. 2 приведен спектр свободных колебаний зарегистрированных в точке 3 (см. рис. 3). Частота наибольшей спектральной составляющей  $f_1 = 1740$  Гц, что для продольной волны при длине образца 119 см соответствует скорости  $V = 1740 \cdot 2,39 = 4159$  м/с.

Скорость распространения ультразвуковой продольной волны по данным сквозного прозвучивания составила 4460 м/с. Среднее дифференциальное значение скорости распространения по данным метода профилирования составило 4453 м/с, что хорошо согласуется с результатом сквозных измерений. Значение скорости ультразвукового импульса для поверхностного прозвучивания по стандартной методике составило от 3800 м/с до 4300 м/с. Таким образом, скорость волны свободных колебаний соответствует некоторому интегральному показателю, усредняющему скорость волны во внутренних областях бетонного массива и – периферийных областях.

Для уточненного определения скорости распространения акустических волн в малоразмерных образцах была выполнена серия измерений методом свободных колебаний и ультразвуковым импульсным методом на лабораторных образцах-призмах 400x100x100 мм из зрелого бетона класса по прочности C35/45, сроком твердения более 2 лет. Измерения скорости распространения ультразвука производились двумя методами – стандартным методом сквозного прозвучивания с регистрацией импульса по первому вступлению, и методом поверхностного профилирования по методике оценки дифференциальной скорости  $V_{diff}$  [6].

На этих же образцах-призмах были выполнены измерения параметров свободных колебаний. На рис. 4 показан частотный спектр свободных колебаний, полученный методом мультипликативного объединения [3] спектров колебаний, зарегистрированных на раз-



ных позициях установки датчика-акселерометра. Расчет спектров выполнялся с использованием программы Cool\_Edit\_Pro.

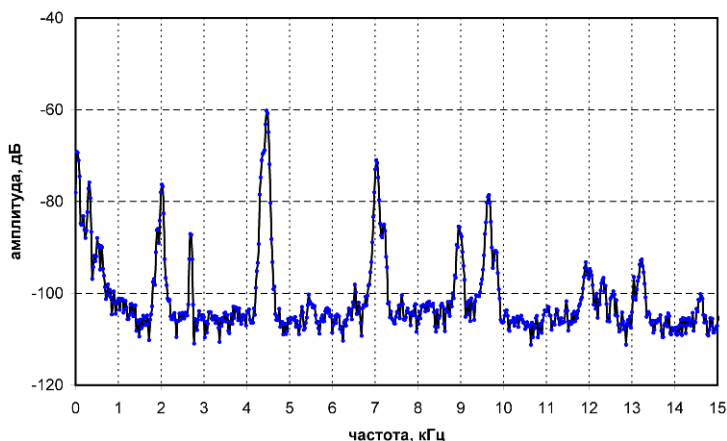


Рис. 4. Частотный спектр свободных колебаний образца-призмы 400x100x100 мм

Мультипликативное объединение спектров получено по методике [3], путем перемножения модулей амплитуд исходных спектров. Эффективность методики заключается в уменьшении амплитуд спектральных составляющих имеющих стохастический характер, например, тех составляющих, которые характерны лишь для отдельных позиций установки датчика и точек нанесения удара.

Для образца размерами 400x100x100 мм длина волны первой моды продольных колебаний равна удвоенной длине образца и составляет 800 мм, которая практически на порядок превосходит поперечные размеры образца. При таком соотношении величин скорость акустической волны приближается к «стержневой»  $V_s$ , определяемой из соотношения

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (4)$$

где  $E$  – динамический модуль нормальной упругости;  $\rho$  – плотность бетона.

Частота первой моды колебаний равна 4463 Гц, длина волны – 0,8 м. Определяем скорость распространения волны  $V_s$

$$V_s = f_1 \cdot \lambda = 4463 \cdot 0.8 = 3570.4, \text{ м/с}, \quad (5)$$

Продольную ультразвуковую волну можно рассматривать как объемную. Для объемной продольной волны скорость распространения определяется из соотношения

$$V_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (6)$$

где  $\nu$  – динамический коэффициент Пуассона.

Зная соотношение скоростей  $V_l$  и  $V_s$  можно рассчитать коэффициент Пуассона  $\nu$

$$\left(\frac{V_l}{V_s}\right)^2 = \varphi^2 = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad (7)$$

откуда следует

$$\begin{aligned} \varphi^2 - 2\varphi^2 \cdot \nu^2 &= 1, \\ \nu &= \sqrt{\frac{\varphi^2 - 1}{2\varphi^2}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для  $V_s = 4463 \cdot 0.8 = 3570$  м/с и  $V_l = 3744$  м/с (см. таб. 1),  $\varphi = 1,049$ ,  $\nu = 0,21$ , что согласуется с типичными значениями этого параметра бетона.

#### *Заключение*

1. Для исследованных элементов и лабораторных образцов из бетонов классов по прочности С30/37, С35/45 ультразвуковой импульсный метод обладает возможностью селективной оценки скорости распространения акустической волны, учитывая неоднородность бетонного массива по прочностным и упруго-деформативным показателям.

2. Значения скорости распространения ультразвуковой волны и волн свободных колебаний в исследованных образцах согласуются.

3. Совместное использования высокочастотных волн ультразвукового метода испытаний и низкочастотных – метода свободных колебаний - позволяет для протяженных бетонных элементов определить динамический коэффициент Пуассона безобразцовым методом.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624-2012. – Введ. (в РБ) 01.01.2016. – М.: 2014. – 16 с.
2. Испытания бетона. Неразрушающий контроль прочности: СТБ 2264-2012 – Введ. 01.01.2013. – Минск: Госстандарт, 2013. - 20 с.
3. Качанов, В.К. Многоканальный мультипликативный метод акустического контроля крупногабаритных компактных строительных конструкций из бетона /В.К. Качанов, И.В. Соколов// Дефектоскопия. – 2008. - № 12. - С. 23-37.
4. Ковалев, А.В. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Полеми и пространственная селекция / А.В. Ковалев, В.Н. Козлов, А.А. Самокрутов // Дефектоскопия. – 1990. - № 2. - С. 29-41.
5. Методы контроля бетона в конструкциях: СТБ EN 12504-4-2014, Часть 4. Определение скорости распространения ультразвукового импульса – Введ. 01.01.2015. Госстандарт, Минск, 2014. – 15 с.
6. Снежков, Д.Ю. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович - Минск: БНТУ, 2016. - 330 с.
7. Christian, U. Impact-Echo measurement on fresh and hardening concrete / U. Christian, H. Grosse, W. Reinhart, R. Beutel // Institute of Construction Materials, University of Stuttgart, 2003. – 6 p.

УДК 620.179.14

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА**

<sup>1</sup>СТРЕЛЮХИН А. В., <sup>2</sup>СОЛОВЕЙ Н. П.

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Минск, Беларусь

Применение магнитного метода контроля для решения многих практических задач показывает, что использование только одной магнитной характеристики часто недостаточно для получения до-