

ными границами. Киев: Наукова думка, 1969.

6. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978.

7. Корсун О. Н., Николаев С. В., Пушков С. Г. Алгоритм оценивания систематических погрешностей измерений

воздушной скорости, углов атаки и скольжения в летных испытаниях // Известия РАН. Теория и системы управления. 2016. № 3. С. 118–129.

Дата принятия: 08.08.2017.

620.179.163: 624.155.15

Применение импакт-эхо метода для измерения скорости звука в тестовых образцах кубической формы из бетона для определения его прочности

В. К. КАЧАНОВ, И. В. СОКОЛОВ, С. А. ФЕДОРЕНКО, С. В. ЛЕБЕДЕВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия, e-mail: kachanovvk@mail.ru

Показано, что теневой метод измерения скорости звука в тестовых образцах кубической формы из бетона для последующего определения прочности этого материала приводит к погрешностям, возникающим из-за эффекта геометрической дисперсии скорости звука. Предложен более точный способ измерения скорости звука в компактных тестовых образцах кубической формы, основанный на использовании импакт-эхо метода.

Ключевые слова: скорость ультразвука, компактное изделие кубической формы, теневой метод, импакт-эхо метод.

It is shown that the through transmission method of measuring the speed of sound in the test samples of the cubic form of concrete for the subsequent determination of the strength of this material leads to the errors arising because of the effect of geometrical dispersion of the sound speed. The paper proposed a more accurate method of measuring the speed of sound in compact test specimens, cubic shape, based on the use of impact-echo method.

Среди неразрушающих методов исследования физико-механических характеристик бетонных строительных конструкций наибольшее распространение получили акустические методы определения прочности бетона на сжатие, которые основаны на измерении скорости ультразвука в этом материале. Прочность бетона определяют как на стадии изготовления строительных конструкций, так и в процессе эксплуатации зданий и сооружений с целью мониторинга их состояния. Акустические методы определения прочности бетона регламентируются российскими нормативными документами [1, 2] и международными стандартами [3]. В основе всех нормативных документов лежит устойчивая корреляционная связь между скоростью C_l продольных волн ультразвука и прочностью R бетона на сжатие, согласно которой с увеличением прочности возрастает скорость [4]. Суть метода определения прочности бетона акустическим методом сводится к построению градуировочной зависимости между скоростью ультразвука C_l , измеренной в бетонных тестовых образцах кубической формы в процессе естественного твердения бетона, и прочностью R , которую получают по результатам механических испытаний тех же образцов. Для нахождения прочности изделия для каждой партии бетона изготов-

ливают стандартные образцы в виде кубов с гранями 200, 150 или 100 мм. Затем в течение 28 дней с момента заливки бетона измеряют скорость ультразвука (например, на 3, 5, 8 и т. д. сутки) одновременно не менее чем в трёх образцах [1]. Потом образцы подвергают механическим испытаниям для определения их прочности R . По результатам механических испытаний прочности и акустических измерений скорости ультразвука C_l в бетоне строят градуировочную зависимость $R=f(C_l)$. В дальнейшем по этой зависимости определяют прочность бетона в построенных зданиях и сооружениях в процессе их эксплуатации.

Основная проблема построения адекватной градуировочной кривой заключается в точности измерения скорости ультразвука в бетоне за время его застывания. Нормативные документы [1–3] рекомендуют определять скорость продольных колебаний C_l ультразвука в тестовых образцах теневым методом. При использовании данного метода скорость ультразвука в изделии, имеющем заранее известную толщину H , определяют по измеренному времени T_C прохождения сигнала: $C_l=H/T_C$. Так как для бетона характерно неравномерное распределение физико-механических свойств по объёму строительной конструкции, то скорость C_l в разных точках

на поверхности куба может иметь различные значения. Поэтому эту скорость рекомендуется определять в нескольких точках на поверхности тестового куба с последующим усреднением результатов измерений.

В нормативных документах [1, 2] параметры сигналов и характеристики используемых пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) не оговариваются, рекомендуется только проводить измерения на предельно низкой частоте из-за высокого затухания ультразвука, связанного с частотно-зависимым поглощением и рассеиванием колебаний в бетоне. Рассеивание на неоднородностях структуры (например, зернах гравия) приводит к появлению многочисленных переотражений ультразвукового сигнала. Данные переотражения представляют собой помеху в виде структурного шума, который маскирует и ослабляет сигнал. Поэтому для уменьшения затуханий за счёт рассеивания ультразвуковых сигналов в стандарте [3] рекомендуется снижать частоту сигнала до значений, при которых длина ультразвуковой волны λ становится больше среднего размера структурных неоднородностей $\bar{D}$ ($\lambda > \bar{D}$). Так, на частоте 50 кГц и при скорости ультразвука $C=4000$ м/с длина ультразвуковой волны в бетоне составляет $\lambda \approx 8$ см. В этом случае удаётся зарегистрировать сигнал, прошедший через бетонное изделие с наполнителем, средний размер структурных неоднородностей $\bar{D}$ которого составляет 30–40 мм.

Столь низкие частоты ультразвукового сигнала и сильное частотно-зависимое затухание ультразвука в совокупности приводят к появлению погрешностей в определении времени T_C задержки низкочастотного сигнала. Погрешности, как правило, связаны с увеличением длительности фронта регистрируемого импульса. Также из-за низкой частоты расширяется диаграмма направленности преобразователя с апертурой L :

$$\Theta \approx \arcsin(\lambda/L).$$

Такое расширение приводит к возрастанию амплитуды структурного шума и увеличению погрешности определения T_C [5]. Уменьшить угол раскрытия диаграммы направленности Θ за счёт увеличения диаметра ПЭП не представляется возможным, так как при этом увеличивается протяжённость ближней зоны преобразователя $(L^2 - \lambda^2)/4\lambda$, которая может оказаться соизмеримой с размерами кубовых тест-образцов [6]. Так как в ближней зоне проводить измерения не рекомендуется, то апертура ПЭП на практике ограничивается значением $L=50$ мм.

Кроме того, на низкой частоте длина ультразвуковой волны в бетоне становится соизмеримой с габаритными размерами тест-образцов ($\lambda \sim H$), что обуславливает появление геометрической дисперсии скорости [3]. В этом случае скорость продольных колебаний в кубических изделиях из бетона $C_{куб}$ уменьшается по сравнению со скоростью звука в неограниченной среде C_l . Точно определить степень уменьшения скорости $C_{куб}$ не удаётся из-за различий в структуре разных партий бетона, а также из-за неопределённости в параметрах зондирующего сигнала и в характеристиках преобразовате-

лей. Поэтому в обзоре зарубежных публикаций [5, 6] погрешность определения прочности бетона акустическими методами в лабораторных условиях оценивается не менее 20 %.

Импакт-эхо метод и его особенности. Сложность в проведении экспериментов и наличие факторов, влияющих на точность определения скорости ультразвука в образцах кубической формы, определили задачу поиска более простого и точного метода измерения скорости. В настоящей работе авторы рассмотрели возможность измерения скорости в бетонных тест-образцах кубической формы ограниченного размера с помощью акустического импакт-эхо метода.

Основное предназначение импакт-эхо метода – измерение толщины бетонных строительных конструкций протяжённостью более одного метра [7]. В настоящее время практически во всех развитых странах контроль импакт-эхо методом является обязательным при строительстве фундаментов, стен, мостовых опор и т. д. [8]. Однако в России импакт-эхо метод для контроля строительных конструкций практически не применяется. Принцип действия импакт-эхо метода основан на анализе собственных частот контролируемого изделия. С помощью специального устройства импактора (от англ. «impact» – удар) по поверхности объекта контроля совершают короткий, но сильный механический удар, инициирующий в изделии акустические свободно затухающие колебания. Эти колебания регистрируются широкополосным ПЭП на поверхности изделия. Снимаемый с ПЭП электрический сигнал преобразуется в цифровую форму и подвергается спектральному анализу. По виду спектральной характеристики определяют собственные частоты, на которых возникают резонансы контролируемого изделия.

Если строительная конструкция имеет вид плиты (рис. 1), длина a и ширина b которой много больше измеряемой толщины H ($a \gg H$; $b \gg H$), то на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) изделия однозначно определяется резонанс, соответствующий толщине плиты: $f_H \sim 1/H$. По частоте f_H рассчитывают либо толщину H (при заранее известной скорости продольной волны в бетоне), либо скорость распространения продольной акустической волны C_l (при заранее

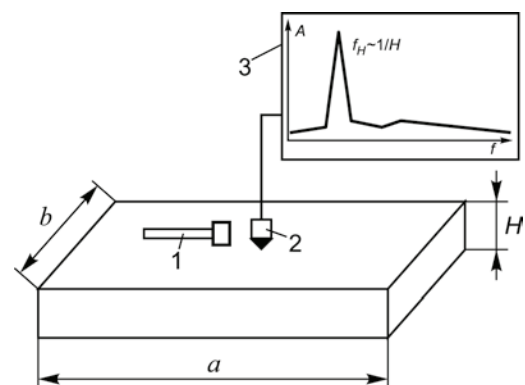


Рис. 1. Схема импакт-эхо метода при измерении толщины H бетонной плиты ($a \gg H$; $b \gg H$):
1 – импактор; 2 – широкополосный пьезоэлектрический преобразователь; 3 – система сбора и обработки информации

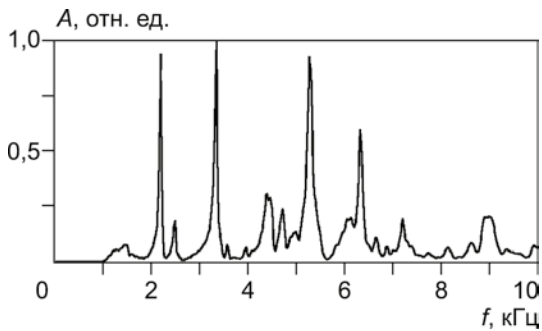


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика компактного бетонного блока длиной $a=600$ мм, шириной $b=450$ мм и толщиной $H=300$ мм, полученная в результате его контроля импакт-эхо методом

известной толщине H). Если толщина плиты H известна, то скорость продольной звуковой волны C_l можно рассчитать по формуле [7]:

$$C_l = 2Hf_H / \beta, \quad (1)$$

где β – коэффициент коррекции скорости звука, зависящий от соотношения размеров измеряемого блока и компенсирующий влияние геометрической дисперсии.

При определении толщины изделия типа плита, у которой измеряемая толщина H в 5 и более раз меньше ширины b и длины a , корректирующий коэффициент $\beta \approx 0,97$. К таким объектам можно отнести стены, фундаменты и перекрытия зданий. В строительных конструкциях, когда толщина в 5 и более раз превосходит другие габаритные параметры, коэффициент $\beta \approx 0,96$ [7]. Такие объекты часто называют изделиями типа свая, к ним также можно отнести колонны и столбы. Изделия, у которых измеряемый габаритный размер много больше или много меньше иных размеров, условно можно назвать протяжёнными изделиями. Протяжённые изделия отличаются от компактных изделий, где все размеры сопоставимы.

Несмотря на приблизительное равенство коэффициентов коррекции для свай и плит, различие в значениях этих коэффициентов принципиально. Оно обусловлено разными волновыми процессами, определяющими резонанс в этих объектах: резонанс длины в сваях обусловлен волной растяжения – сжатия (продольной волной), а в плитах – волной Лэмба [7]. Коэффициент коррекции β компенсирует погрешность, вызванную влиянием эффекта геометрической дисперсии скорости, которая возникает в изделиях с ограниченными размерами. При этом коэффициент β учитывает как реальные размеры контролируемого изделия, так и соотношение измеряемой толщины изделия с длиной резонансной волны λ . Именно поэтому коэффициент β имеет вполне определённое значение для каждой строительной конструкции с конкретными размерами a , b , H .

Коэффициент β легко определяется для протяжённых изделий (плит и свай) [7], однако в изделиях, у которых габаритные размеры a , b сопоставимы с измеряемой толщиной H , его нахождение затруднительно. Поэтому с помощью импакт-эхо метода контролируют в основном протяжённые объекты,

так как только в этом случае на спектральной характеристике однозначно определяется резонансная частота f_H . По этой частоте (с учётом β) по формуле (1) вычисляется толщина изделия при известной скорости C_l или скорость продольных колебаний в бетоне при известной толщине H [8].

Проблемы контроля компактных изделий импакт-эхо методом. Так как в компактном изделии измеряемая толщина $H \sim a$, $H \sim b$, то на АЧХ компактного объекта резонансные пики f_H , f_a , f_b , соответствующие этим размерам, находятся недалеко друг от друга (рис. 2). Кроме того, на АЧХ компактного изделия присутствует значительное число дополнительных резонансных пиков, частоты которых определяются различными модами колебаний. В результате на спектральной характеристике искомый резонансный пик на частоте $f_H \sim 1/H$ однозначно не определяется, из-за чего импакт-эхо метод для контроля компактных строительных конструкций не используется [7]. Решение проблемы контроля компактных изделий из бетона было найдено в МЭИ [9–11]. Оно предполагает проведение измерений спектральных характеристик в N точках на поверхности изделия с последующим запоминанием результатов измерений. Далее спектральные характеристики, полученные в результате парциальных измерений, подвергаются мультипликативной обработке. Так как положение пика, соответствующего толщине строительной конструкции, на всех характеристиках неизменно, а амплитуды и положения других пиков изменяются в зависимости от положения пары излучатель–приёмник, то перемножение N спектральных характеристик приводит к выделению пика на частоте $f_H \sim 1/H$. Однако и в этом случае приходится определять толщину с помощью корректирующего коэффициента β , который из-за эффекта геометрической дисперсии для каждого компактного объекта имеет свое значение. Вычисление коэффициента $\beta = f(a/\lambda, b/\lambda)$ производится по сложной схеме, в которой участвуют размеры a , b [10, 11].

Рассчитать корректирующий коэффициент β можно методом конечных элементов в программной среде ANSYS [12]. Коэффициент β вычисляют как отношение скорости продольной звуковой волны в измеряемом габаритном размере моделируемого объекта к скорости продольной звуковой волны в бесконечном полупространстве. Последняя скорость определяется по известным значениям характеристик материала, таким как модуль Юнга, коэффициент Пуассона и плотность. Для объекта кубической формы, выполненного из бетона с коэффициентом Пуассона равным 0,2, корректирующий коэффициент $\beta \approx 0,87$. Практика показывает, что результаты моделирования, полученные в ANSYS, коррелируют с результатами, найденными в реальных экспериментальных условиях [13].

Результаты экспериментов по определению скорости ультразвука в тестовых блоках кубической формы в процессе застывания бетона. Авторы различными методами определяли скорость акустических колебаний в компактных бетонных изделиях кубической формы. Эксперименты проводили в процессе застывания бетона. Для этого из бетона были изготовлены стандартные образцы кубической формы с гранями 150 мм. Образцы были наполнены грави-

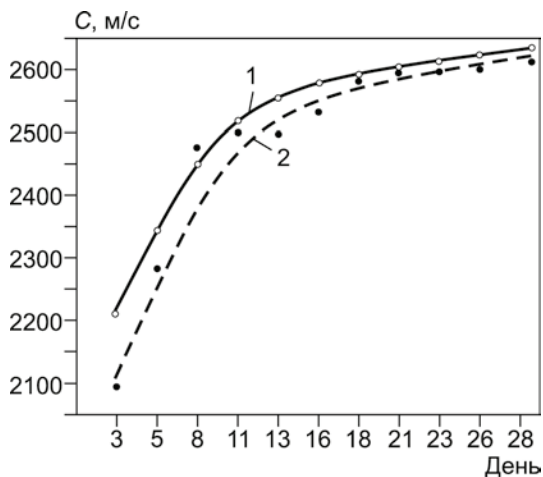


Рис. 3. Изменения скорости звука в зависимости от застывания образца кубической формы из бетона в течение 28 дней при измерениях импакт-эхо методом (1) и теневого методом (2)

ем, причём неоднородности имели относительно небольшой размер $\bar{D}=10...20$ мм. Далее в течение 28 дней с момента заливки бетона (на 3, 5, 8, 11, 13, 16, 18, 21, 23, 26 и 28 сутки) на частоте 50 кГц определялась скорость импакт-эхо методом, а также теневого методом.

Теневым методом определения скорости был реализован с помощью ультразвукового дефектоскопа A1220 MONOLITH (Россия). Измерения импакт-эхо методом проводили на оборудовании Freedom Data PC фирмы Olson Instruments, Inc. (США). Из [1, 2] следует, что скорость измеряли теневого методом с использованием ультразвуковых раздельных преобразователей с апертурой $L=50$ мм одновременно на трёх кубических тестовых образцах в трёх точках на поверхности куба: в центре объекта, а также по его краям. Результаты всех измерений усреднялись. Измерение же импакт-эхо методом производилось в одной точке – в центре каждого куба.

На рис. 3 представлен график зависимости скорости, измеренной теневого и импакт-эхо методами, от дня застывания бетона. Показан заметный разброс значений, полученных теневого методом в начальные дни измерений, в конечные дни скорость практически стабилизировалась. На 28 сутки значения скоростей импакт-эхо и теневого методов различаются примерно на 5 %, что, по мнению авторов, определяется погрешностями теневого метода измерения скорости ультразвука в компактном изделии кубической формы.

Заключение. Рекомендуемое стандартами измерение скорости ультразвука в бетонных тестовых кубических образцах ограниченного размера теневого методом с использованием низкочастотных сигналов является трудоёмким процессом, приводящим к дополнительным погрешностям, которые возникают из-за неопределённости в выборе параметров зондирующего сигнала, параметров используемых датчиков, а также из-за неоднородной структуры бетона и эффекта геометрической дисперсии скорости.

Показано, что использование более простого и недорогого импакт-эхо метода позволяет однозначно определять скорость звука в бетонных кубических тестовых образцах без дополнительной обработки сигналов. Это происходит благодаря совпадению значений резонансных частот по трём основным координатным осям. Использование импакт-эхо метода упрощает процесс измерений и повышает точность нахождения скорости для построения градуировочных кривых $R=f(C_I)$ и последующего определения прочности бетона.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-00096).

Л и т е р а т у р а

1. **ГОСТ 17624–2012.** Ультразвуковой метод определения прочности бетона.
2. **СТО 36554501-009–2007.** Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.
3. **ASTM C 597 (2002).** Standard test method for pulse velocity through concrete. Annual Book of ASTM Standards 4.
4. **Коробко В. И., Коробко А. В.** Контроль качества строительных конструкций: виброакустические технологии. М.: Ассоциации строительных вузов, 2003.
5. **Бриганти М., Сумбатян М. А.** Акустические методы в неразрушающем контроле бетона: обзор зарубежных публикаций в области теоретических исследований // Дефектоскопия. 2013. № 4. С. 3–16.
6. **Бриганти М., Сумбатян М. А.** Акустические методы в неразрушающем контроле бетона: обзор зарубежных публикаций в области экспериментальных исследований // Дефектоскопия. 2013. № 2. С. 52–67.
7. **Sansalone M., Streett W. B.** Impact-Echo: Nondestructive Testing of Concrete and Masonry, PA: Bullbrier Press, Jersey Shore, 1997.
8. **ASTM C1383-04 (2010).** Impact-Echo Method.
9. **Пат. 2354932 РФ.** Резонансный способ ультразвуковой толщинометрии / С. Л. Авраменко, И. В. Соколов, В. К. Качанов // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 13.
10. **Качанов В. К., Соколов И. В., Авраменко С. Л., Тимофеев Д. В.** Многоканальный мультипликативный метод акустического контроля крупногабаритных компактных строительных конструкций из бетона // Дефектоскопия. 2008. № 12. С. 23–36.
11. **Качанов В. К., Соколов И. В.** Акустический контроль бетонных конструкций методом собственных частот. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & KG, Saarbrücken. 2012. ISBN 978-84848-0651-7.
12. **ANSYS Mechanical APDL Stuctural Analysis Guide.** 2013. Release 15. P. 498.
13. **Jording A. C.** Damage Detection in Metamorphic Stone Blocks Utilizing Impact-echo Testing and Modal Analysis, University of Nebraska Lincoln, Architectural Engineering. Dissertations and Student Research, 2012.

Дата принятия: 13.09.2017.