

2. Корчагина Е. Н., Ермакова Е. В., Варганов В. П. Калориметрия сгорания топлив // Мир измерений. 2012. № 2. С. 32—39.

3. Корчагина Е. Н., Ермакова Е. В., Моцак Т. А., Уткина Л. А., Говорова Е. С. Проблемные вопросы проведения межлабораторных сравнительных испытаний при измерениях в углехимических лабораториях // Метрология и приборы. Харьков. 2014. № 2. С. 58—63.

4. Корчагина Е. Н., Ермакова Е. В., Уткина Л. А., Говорова Е. С. Итоги межлабораторных сравнительных испытаний качественных показателей угля // Уголь Украины. 2014. № 5. С. 42—46.

5. ГОСТ 25543—88. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам.

6. ГОСТ Р ИСО 13528—2010. Статистические методы. Применение при экспериментальной проверке компетентности посредством межлабораторных сравнительных испытаний.

7. ГОСТ Р ИСО 5725-5—2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 5. Альтернативные методы определения прецизионности стандартного метода измерений.

8. ГОСТ Р ИСО 5725-6—2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике.

Дата принятия 19.06.2015 г.

## АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

620.179.16

### Безобразцовое измерение скорости ультразвука в бетоне с помощью алгоритма фокусировки на плоскость

В. К. КАЧАНОВ, И. В. СОКОЛОВ, Д. В. ТИМОФЕЕВ, А. А. СЕНИЦЫН,  
Р. В. КОНЦОВ

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

Описан способ безобразцового измерения скорости ультразвуковых колебаний в строительных конструкциях из бетона с помощью ультразвуковых фазированных антенных решеток, в которых обработка сигналов проводится по алгоритму фокусировки на плоскость, ориентированному на обнаружение отражающих плоскостей. Приведены результаты измерения скорости ультразвука в бетоне.

**Ключевые слова:** скорость ультразвуковых колебаний, алгоритм фокусировки на плоскость, ультразвуковая томография.

Ultrasound waves velocity in concrete structures measurement method is described. The velocity is measured without application of sample by means of supersonic phased antenna arrays. The signal processing is carried out by means of focusing on a plane algorithm, oriented on detection of reflecting planes. The velocimetry in concrete samples measurement results are presented.

**Key words:** supersonic ultrasound waves velocity, focusing on a plane algorithm, ultrasound tomography.

При ультразвуковом (УЗ) контроле протяженных строительных конструкций (СК) из бетона (сооружений радиационной и биологической защиты, перекрытий, стен зданий и др.) возможен только односторонний доступ к поверхности объектов. Это исключает использование теневого метода для измерения толщины или определения скорости УЗ-колебаний (УЗК) в бетоне и предполагает применение менее чувствительного одностороннего эхо-метода. Однако одно-

канальный эхо-импульсный метод не пригоден для контроля протяженных (более 0,5 м) СК из-за ряда факторов.

Во-первых, аномально большое частотно-зависимое затухание УЗ-сигналов в бетоне требует понижения частоты зондирующего сигнала до  $f_0 \leq 100$  кГц, что приводит к расширению диаграммы направленности УЗ-преобразователя, снижению азимутальной разрешающей способности и не-

возможности точно определять координаты отражающих поверхностей [1].

Во-вторых, для использования УЗ-эхо-импульсного одностороннего метода измерений необходима априорная информация о скорости УЗК в бетоне (при измерении толщины) или толщине изделия (для измерения скорости  $c_{пр}$  УЗ продольной волны). Однако при контроле ответственных СК невозможно использовать эталонные образцы бетона для предварительного измерения скорости УЗ продольной волны, из-за чего приходится измерять скорость УЗК непосредственно на изделии.

Отечественные и зарубежные стандарты, устанавливающие методику определения прочности бетона посредством измерений продольной скорости УЗК в бетоне [2, 3], предлагают различные способы безобразцовых измерений скорости  $c_{пр}$ , в основу которых положена ее связь со скоростью поверхностной волны  $c_n$  [4–7]. Последнюю достаточно просто можно определить с помощью двух пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), расположенных на поверхности изделия на фиксированном расстоянии  $b$  друг от друга. Излучающий ПЭП формирует акустический импульс, который распространяется по поверхности контролируемого изделия и через время  $t = b/c_n$  поступает на приемный ПЭП. Скорость продольных УЗК определяют по скорости распространения поверхностной волны в данном материале:  $c_{пр} = k c_n$ , а коэффициент пропорциональности  $k$  измеряют на эталонном образце в том случае, когда материал однородный (что практически всегда выполняется при контроле изделий из металлов). Однако рекомендованный в [2] метод определения скорости УЗК неприемлем при контроле крупногабаритных конструктивно сложных бетонных сооружений, так как физико-механические характеристики бетона (и, следовательно, скорости УЗК) на его поверхности и внутри могут существенно различаться.

Безэталонный УЗ-эхо-метод измерения толщины не имеет указанного недостатка [8], поскольку в нем используются только продольные волны. В этом методе первый из двух ПЭП, имеющий широкую диаграмму направленности, излучает продольную волну как по нормали к поверхности, так и под углом к ней. Он работает в совмещенном режиме и принимает прямой отраженный от дна эхо-сигнал, а на второй ПЭП поступает сигнал, отраженный под углом от дна. По измеренным задержкам эхо-сигналов вычисляют скорость УЗК и толщину изделия. Данный метод хорошо зарекомендовал себя при контроле изделий из металлов, однако он имеет недостаточную чувствительность вследствие большого интегрального затухания УЗ-сигналов в протяженных бетонных изделиях, что ограничивает его применение при контроле СК.

Перечисленные проблемы привели к тому, что одноканальный эхо-импульсный метод контроля практически не использовался при УЗ-толщинометрии протяженных бетонных изделий вплоть до появления в конце 1990-х гг. УЗ низкочастотных томографов на основе УЗ фазированных антенных решеток (ФАР) [9]. Подавляющее большинство таких томографов работают по известному комбинированному алгоритму построения томограмм SAFT-C (Synthetic Aperture Focusing Technique). При использовании этого алгоритма УЗ-сигнал фокусируется последовательно в каждой точке изделия (алгоритм фокусировки в точку) с последующим построением двухмерного изображения контролируемого объекта. В случае УЗ ФАР требуются  $N$  пьезоэлектрических преобразователей, апертура синтезируется всеми возможными

их парными комбинациями (излучатель — приемник). В результате общее количество реализаций акустических колебаний, принятых такой антенной решеткой, равно  $N(N+1)/2$ , поэтому выигрыш в отношении сигнал — шум по мощности от комбинационного зондирования составляет  $(N+1)/2$  [10]. Таким образом, использование УЗ низкочастотных ФАР решило проблемы чувствительности и направленности излучения при эхо-контроле бетонных изделий.

В алгоритме SAFT-C также предполагается априорное знание скорости УЗ-колебаний в контролируемом бетонном изделии. Решить эту проблему позволил предложенный авторами метод определения скорости на основе УЗ ФАР, в котором для обработки сигналов используется алгоритм фокусировки на плоскость [11] и эталонный образец отсутствует. Данный алгоритм отличается более высокой помехоустойчивостью от известного алгоритма фокусировки в точку, поскольку ориентирован на обнаружение плоскостных отражателей, а точечные отражатели игнорируются [12]. Функционирование алгоритма фокусировки на плоскость поясняет рис. 1 для раздельно совмещенной УЗ ФАР, состоящей из излучающей части (ИФАР) с  $I$  излучающими элементами и приемной части фазированной антенной решетки (ПФАР) с  $J$  приемными преобразователями. В результате перебора всех возможных комбинаций пар излучателей и приемников регистрируются  $IJ$  дефектограмм  $U_{i,j,R,\alpha}(t)$  для эхо-сигналов, отраженных от плоского отражателя с координатами  $(R, \alpha)$  и прошедших суммарный путь  $AO+OB=CB$ . Суммирование сигналов осуществляется с учетом их задержки в акустических каналах ФАР [7]:

$$T_{i,j,R,\alpha} = c_{пр}^{-1} \sqrt{4R_0^2 + (ix_i - jx_j)^2 + 4R_0(ix_i - jx_j) \sin \alpha}, \quad (1)$$

где  $R_0$  — кратчайшее расстояние от излучающего преобразователя  $ix_i$  до отражающей плоскости.

Для каждой парной комбинации суммарный сигнал  $U_{\Sigma}(R, \alpha) = \sum_i \sum_j U_{i,j}(T_{i,j,R,\alpha})$  отображается соответствующей амплитудой  $U_{\Sigma}$  в точке с координатами  $(R, \alpha)$ . Совокупность суммарных значений амплитуд формирует в координатах  $(U_{\Sigma}, R, \alpha)$  своеобразный трехмерный образ изделия. Если

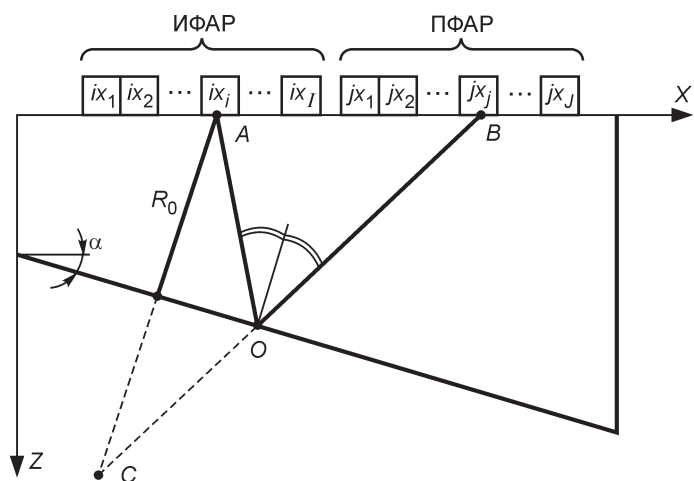


Рис. 1. Схема акустического тракта для одной из пар УЗ-преобразователей раздельно-совмещенной ФАР при определении координат плоскости с применением алгоритма фокусировки на плоскость

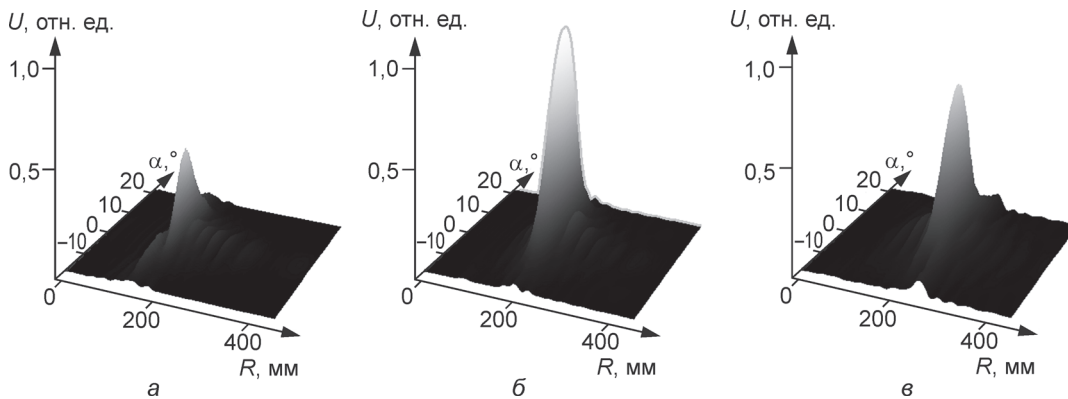


Рис. 2. Трехмерный образ отражающей плоскости при различных (а – в) скоростях  $c_{пр}=2700$  м/с; 3300 м/с (реальное значение скорости); 3900 м/с. При построении использован УЗ-частотно-модулированный сигнал, средняя частота  $f_0=200$  кГц, шаг измерений 600 м/с

отражающая плоскость в изделии находится на расстоянии  $R$  и под углом  $\alpha$ , то ее трехмерный образ примет вид четко выраженного пика. Так как результат измерения толщины изделия соответствует вероятности принадлежности точки с координатами  $(R, \alpha)$  этой плоскости, то представление результатов поиска плоскости было названо «Р-скан». Вероятность присутствия плоскости определяется амплитудой пика, соответствующей суммарной амплитуде эхо-сигналов всех  $IJ$  каналов ФАР (рис. 2).

По координатам максимума пика находят координаты отражающей плоскости (расстояние  $R$  до плоскости и угол наклона  $\alpha$ ) при условии, что взятая для расчета скорость строго связана с реальной скоростью УЗК  $c_{пр}$  в бетоне.

На «Р-скане» отсутствуют максимумы (пики), соответствующие точечным неоднородностям (дефектам). Это означает, что алгоритм фокусировки на плоскость предназначен исключительно для обнаружения протяженных плоских отражателей.

На рис. 2, б показан график трехмерного «Р-скана», построенный для реальной скорости УЗК  $c_{пр}=3300$  м/с в плоскопараллельном ( $\alpha=0^\circ$ ) бетонном изделии толщиной  $R=200$  мм; на рис. 2, а, в приведены «Р-сканы» при скоростях, не совпадающих с реальной скоростью УЗК. Как следует из сопоставления «Р-сканов», если в (1) введено реальное значение  $c_{пр}$ , то амплитуда пика на трехмерном изображении максимальна (рис. 2, б) и координаты пика позволяют точно определить координаты дна изделия. В противном случае отраженные от плоскости сигналы складываются не синфазно, максимумы пиков меняют свое положение, имеют меньшую амплитуду, даже распадаются, а их координаты не соответствуют реальным значениям.

Оценить реальную скорость УЗК можно визуально по набору из трех «Р-сканов», рассчитанных и построенных для трех значений скорости, задаваемых в некотором реальном диапазоне с шагом  $\Delta c=600$  м/с. Однако с помощью компьютерного измерительного устройства можно точнее измерить амплитуду пиков на большем числе «Р-сканов», найти максимальную амплитуду и определить по максимальной пику реальную скорость УЗК в бетоне. Очевидно, что точность измерения будет тем выше, чем меньше шаг изменения скорости  $\Delta c$ . По результатам вычисления максимального значения амплитуды пиков на «Р-сканах», полученных при разных скоростях УЗК при шаге  $\Delta c=100$  м/с в диапазоне 2000–6000 м/с, было установлено, что максимум амплитуды соответствует реальной скорости УЗК в бетоне  $c_{пр}=3300$  м/с. По координатам этого же пика на рис. 2, б

находим точные координаты плоскости, измеряем истинную толщину изделия.

Таким образом, предложенный алгоритм фокусировки на плоскость для обработки сигналов от УЗ ФАР позволил создать безобразцовый метод измерения скорости УЗК и толщины строительных конструкций из бетона.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № 2014/123 в сфере научной деятельности на 2015 год (тема № 1176 «Организация проведения научных исследований»).

## Литература

1. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль: Справочник // Под ред. В. В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004.
2. СТО 36554501-009—2007. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.
3. ASTM C 597 (2002). Standard test method for pulse velocity through concrete.
4. Бутенко А. И., Шкарлет Ю. М. О некоторых возможностях ультразвуковой безэталоной толщинометрии // Тез. докл. VII Всесоюз. конф. по неразрушающему контролю. Киев, 1974. С. 198—200.
5. Korolev M. V., Karpelson A. E., Shevaldykin V. N. Ultrasonic Thickness Gaging Standards in USSR // Proc. 10<sup>th</sup> World Conf. Non-destructive Testing. Moscow (USSR), 1982. V. 2. P. 50—59.
6. Carodiskey T. J., Paul A. M. Thickness Measurement in Materials of Unknown Acoustic Velocity // NDTnet. (Электронный журнал). 1997. V. 2. N. 10.
7. Титов С. А., Маев Р. Г., Богаченков А. Н. Измерение скорости акустической волны и толщины образца при помощи решетчатых ультразвуковых преобразователей // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 22. С. 8—14.
8. Шевалдыкин В. Г. О безэталоном измерении толщины изделий с переменной по глубине скорости звука // Дефектоскопия. 1986. № 3. С. 20—22.
9. Козлов В. Н., Самокрутов А. А., Шевалдыкин В. Г. Ультразвуковая дефектоскопия бетона эхо-методом. Состояние и перспективы // В мире неразрушающего контроля. 2002. № 2 (16). С. 6—10.
10. Schickert M. Towards SAFT-Imaging in Ultrasonic Inspection of concrete // Proc. Int. Symp. Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE). Berlin, 1995. P. 411—418.
11. Качанов В. К., Соколов И. В., Тимофеев Д. В., Туркин М. В., Шалимова Е. В. Обнаружение отражающих плоскостей при ультразвуковой томографии строительных конструкций из бетона // Дефектоскопия. 2010. № 5. С. 36—44.
12. Качанов В. К., Соколов И. В., Тимофеев Д. В., Туркин М. В., Шалимова Е. В., Конов М. М. Особенности применения метода «фокусировка в точку» при УЗ томографии изделий из сложноструктурных материалов // Дефектоскопия. 2010. № 4. С. 30—44.

Дата принятия 09.06.2015 г.