

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА «ФОКУСИРОВКА В ТОЧКУ» ДЛЯ БЕЗЭТАЛОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ТОМОГРАФИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ БЕТОНА

© 2019 г. В.К. Качанов^{1,*}, И.В. Соколов¹, Р.В. Концов¹, Д.В. Тимофеев¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия 111250 Москва,
ул. Красноказарменная, 14
*E-mail: kachanovvk@mail.ru

Поступила в редакцию 11.12.2018; после доработки 29.03.2019
Принята к публикации 05.04.2019

Отмечено, что в большинстве ультразвуковых томографов бетонных изделий при построении томограмм используют значение скорости объемных (продольных, поперечных) ультразвуковых волн, рассчитанное по легко измеряемой скорости поверхностных волн. Однако в строительных конструкциях, подверженных климатическим или иным воздействиям, состояние структуры бетона на поверхности и в глубине объекта контроля может сильно различаться, что приводит к погрешностям в определении объемной скорости ультразвука и, как следствие, к погрешностям в отображении дефектов и габаритов изделий. С целью повышения точности определения координат дефектов предложен новый безэталонный способ измерения скорости ультразвука в объеме крупногабаритных строительных конструкций с помощью ультразвуковых антенных решеток, использующих при построении томограмм алгоритм «фокусировка в точку» при условии, что в изделии присутствует точечный отражатель (например, технологическое отверстие).

Ключевые слова: ультразвуковые колебания, безэталонное измерение скорости, строительные конструкции из бетона, антенная решетка, алгоритм «фокусировка в точку».

DOI: 10.1134/S0130308219060034

ПРОБЛЕМА СОЗДАНИЯ БЕЗЭТАЛОННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ КОНТРОЛЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Ультразвуковой (УЗ) контроль ряда крупногабаритных строительных конструкций (СК) возможен только при одностороннем доступе к изделию, что предполагает использование эхоимпульсного метода контроля [1, 2]. Однако УЗ эхометод контроля крупногабаритных СК ограничен из-за относительно невысокой чувствительности метода, возникающей из-за большого интегрального частотно-зависимого затухания УЗ волн в СК большой протяженности и из-за сложной структуры СК — наличия металлической арматуры и зерен гравия в бетоне. Если сечение металлической арматуры меньше 1 см, а размер наполнителя (зерен гравия) больше 1 см, то в таких СК «плотность упаковки» наполнителя, как правило, существенно выше «плотности упаковки» арматуры. Таким образом, основное влияние на экранирование УЗ эхосигналов оказывает наполнитель, который является причиной возникновения сигнала структурного шума, маскирующего и искажающего УЗ эхосигналы. Поэтому для повышения чувствительности контроль СК проводят на низких частотах ($f_0 \sim 100$ кГц и ниже), но и в этом случае не всегда удается зафиксировать донный эхосигнал $T_{\text{зад}}$, по которому следует определять скорость ультразвука $C = 2H/T_{\text{зад}}$ в бетоне при заранее известной толщине изделия H .

Проблема повышения чувствительности была частично решена с появлением в последние годы УЗ эхоимпульсных томографов, основанных на использовании УЗ низкочастотных (НЧ) антенных решеток (АР) [3, 4]. Но получить адекватное отображение координат дефектов при использовании томографов удастся только при условии, что заранее известна скорость УЗК в бетоне, так как неверное значение скорости ультразвука дает ложное представление о параметрах объекта контроля (ОК).

Определение скорости по формуле $C = 2H/T_{\text{зад}}$ предполагает, что толщина изделия H известна заранее, однако в некоторых случаях измерить протяженность крупногабаритного ОК не удастся. В этом случае используют безэталонный способ определения скорости продольных УЗ волн C_L (поперечных УЗ волн C_T) по легко измеряемой скорости распространения поверхностных волн C_S [5—7] с учетом известного соотношения скоростей $C_{L,t} = \gamma C_S$, где коэффициент γ принимает значения в диапазоне 0,5—0,95 в зависимости от свойств материалов и типов волн [1].

Разновидности этого способа описаны в [8—9], где также сравниваются скорость ультразвука по поверхности и скорость ультразвука в объеме изделия. В последние годы появились похожие безэталонные методы измерения скорости, в которых вместо одиночных преобразователей используются антенные решетки [10]. Однако у всех этих безэталонных способов есть ограничения,

закрывающиеся в том, что их следует использовать только в том случае, когда СК не подвержены климатическим или иным воздействиям, так как в противном случае состояние структуры бетона (и скорости УЗ волнсоответственно) на поверхности СК и в глубине могут сильно различаться. Кроме того, точность измерения скорости поверхностной волны зависит от состояния поверхности СК. В случае неровной шероховатой поверхности эти методы приводят к большим погрешностям в значениях скорости C_s , измеренной в различных местах СК.

В [11] описан безэталонный метод измерения одновременно скорости ультразвука и толщины изделия, основанный на использовании двух фазированных антенных решеток, установленных на призмах на поверхности ОК по направлению «друг к другу». С помощью специального алгоритма обработки сигналов с использованием метода, подобного методу наименьших квадратов, удается определить одновременно скорость звука и толщину объекта контроля с плоскопараллельными границами.

В [12] был описан предложенный в МЭИ безэталонный метод определения скорости ультразвука, основанный на использовании алгоритма обработки сигналов УЗ антенной решетки «фокусировка на плоскость». Достоинством алгоритма «фокусировка на плоскость» является его более высокая помехоустойчивость по отношению к структурному шуму (СШ) по сравнению с алгоритмом «фокусировка в точку», так как алгоритм «фокусировка на плоскость» ориентирован на обнаружение плоскостного отражателя (дна изделия) и относительно плохо отображает «точные» дефекты и элементы структуры СК. Безэталонное определение скорости ультразвука осуществляется по результатам одного измерения. Затем в вычислительном устройстве осуществляется построение набора трехмерных томограмм изделия для различных значений скорости ультразвука $C_{расч}$, заданных при расчете томограмм. Далее для каждой томограммы (построенной для каждого значения расчетной скорости ультразвука $C_{расч}$) производится измерение амплитуды образа отраженного от дна сигнала U , затем строится зависимость амплитуды от значения расчетной скорости $U(C_{расч})$, определяется максимальная амплитуда и по томограмме с максимальной амплитудой отклика от дна судят об истинной объемной скорости ультразвука в бетоне.

Однако оба безэталонных метода [11,12], в которых «опорным» отражателем является дно СК, имеют ограничения: они применимы только тогда, когда дно изделия имеет плоскую конфигурацию. Кроме того, их возможно использовать только в тех случаях, когда дно изделия принципиально удастся обнаружить, что не всегда возможно при контроле протяженных фундаментов, мостовых опор и других крупногабаритных СК толщиной более 1 м. Вместе с тем в таких крупногабаритных СК зачастую присутствуют различные технологические отверстия, предназначенные для прокладки труб или кабелей, которые могут служить «опорным» отражателем. Оказалось, что для таких изделий возможно создание безэталонного способа определения скорости ультразвука с помощью традиционного алгоритма обработки сигналов УЗ антенной решетки «фокусировка в точку».

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМА «ФОКУСИРОВКА В ТОЧКУ» ПРИ ТОМОГРАФИИ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

УЗ антенные решетки составляют основу большинства УЗ НЧ томографов строительных конструкций. Функционирование УЗ антенн осуществляется на основе положений, используемых в радиолокационных антеннах. Особенностью использования антенных решеток в УЗ томографах изделий из бетона является применение алгоритма обработки сигналов антенных решеток САФТ (от английского SAFT — Synthetic Aperture Focusing Technique [13—15]), при котором проводится последовательная фокусировка УЗ луча в каждую точку объекта контроля с последующим построением в вычислительном устройстве томограммы изделия. Принцип фокусировки УЗ луча в j -ю точку изделия поясняется на рис.1, где для упрощения показана расположенная на плоской поверхности изделия УЗ антенна, состоящая из $N = 4$ элемента. В данном примере УЗ сигнал распространяется от излучающего преобразователя (ИП) до «точечного» цилиндрического отражателя (дефекта); затем, отражаясь от цилиндрического дефекта, сигнал попадает на приемные преобразователи ПП₁—ПП₃.

Собственно фокусировка в j -ю точку осуществляется в вычислительном устройстве посредством задержки отраженных от j -ой точки изделия сигналов на время $T_{зад1} — T_{зад3}$ таким образом, чтобы эхоимпульсы, пришедшие на все ПП, суммировались когерентно. Время задержки сигналов $T_{задj}$ для каждой j -ой точки изделия определяется по времени прохождения УЗ импульса от ИП до дефекта и обратно от дефекта до каждого ПП:

$$T_{\text{зад}j} = \frac{L_j}{C} = \frac{L_{\text{изл}} + L_{\text{отр}j}}{C}. \quad (1)$$

Путь, который проходят УЗ сигналы от ИП до дефекта и обратно, складывается из расстояния $L_{\text{изл}}$ от ИП до дефекта и расстояния $L_{\text{отр}}$ от дефекта до ПП (см рис. 1). В общем случае суммарный путь для каждой пары преобразователей составляет $L_j = L_{\text{изл}} + L_{\text{отр}j}$. При наличии в j -ой точке отражателя (технологического отверстия или дефекта) после когерентного суммирования сигналов в $N-1$ каналах формируется импульс с амплитудой $U_{\Sigma j} > 0$. При отсутствии в j -ой точке отражателя амплитуда сигнала для j -ой точки равна нулю ($U_{\Sigma j} = 0$). Далее производится последовательная фокусировка УЗ сигналов в каждую точку ОК, а затем в вычислительном устройстве строится томограмма изделия по совокупности эхосигналов, отраженных от всех точек объекта контроля.

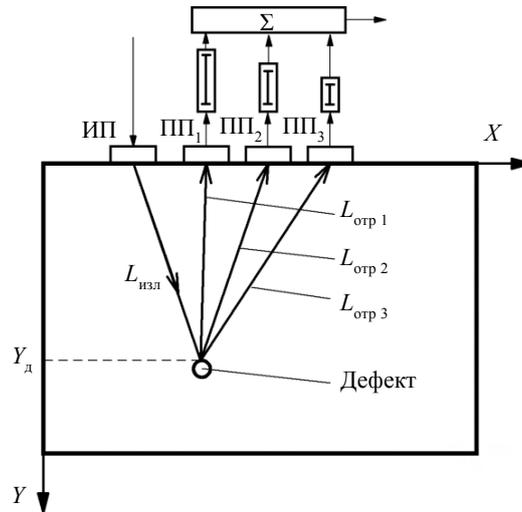


Рис.1. Схема работы алгоритма «фокусировка в точку».

Как было отмечено выше, для определения скорости ультразвука в бетоне по формуле $C = 2H/T_{\text{зад}}$ необходимо заранее знать расстояние H до дна СК. Однако в ряде случаев с помощью алгоритма «фокусировка в точку», ориентированного на обнаружение точечных отражателей, определить расстояние до дна ОК не представляется возможным, так как донная поверхность с помощью этого алгоритма отображается неадекватно [15]. Этот эффект поясняется на рис. 2,

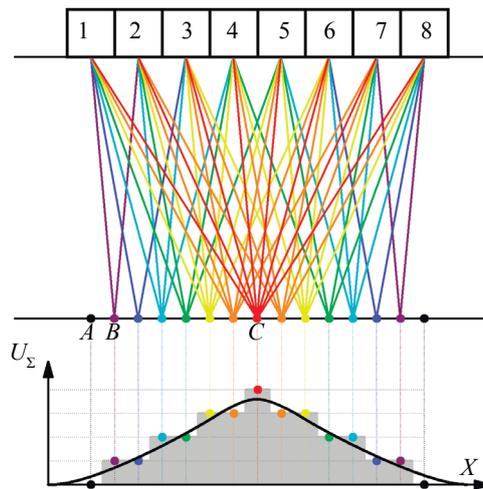


Рис. 2. Формирование изображения плоскости при использовании алгоритма «фокусировка в точку».

где для АР, состоящей из 8 преобразователей, показаны пути для излучаемых и принимаемых сигналов. От точки C зеркально отражаются и затем суммируются четыре сигнала. От точки B отражается и приходит на АР единственный отраженный сигнал, а эхосигналы от точки A на антенную решетку вообще не поступают. В результате на изображении плоскости отображение точки C имеет максимальную амплитуду. Точке B будет соответствовать амплитуда одного эхосигнала, а точка A не отображается. В итоге изображение протяженного дна изделия, полученное с помощью алгоритма «фокусировка в точку», не соответствует истинному виду отражающей поверхности: на двухмерном B -скане донная поверхность представлена в виде короткого отрезка с плавно спадающей амплитудой. В этом случае изображение дна становится похожим на изображение технологического отверстия и однозначно определить на томограмме дно СК не удастся.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА «ФОКУСИРОВКА В ТОЧКУ» ПРИ КОНТРОЛЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ БЕТОНА ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХИ ТИПА «СТРУКТУРНЫЙ ШУМ»

Особенности отражающих свойств отражателей различной формы при использовании алгоритма «фокусировка в точку» проявляются при томографии бетонных изделий при наличии помехи типа «структурный шум». В [16] показано, что структурный шум представляет совокупное отражение УЗ зондирующего сигнала от многочисленных случайно расположенных структурных неоднородностей (например, зерен гравия в бетоне). Для уменьшения влияния структурного шума снижают частоту зондирующего сигнала таким образом, чтобы длина УЗ волны λ была существенно больше среднего размера наполнителя бетона $\bar{D}(\lambda \geq (3-5)\bar{D})$. Для удовлетворительного обнаружения дефекта на фоне структурного шума его размер D должен быть больше длины волны λ . Тем самым, следует выбирать такую частоту зондирующего сигнала, чтобы выполнялось условие $(3-5)\bar{D} \leq \lambda < D$. Как правило, это условие выполняется при контроле изделий из бетона при частоте зондирующего сигнала 50 – 100 кГц [16].

Основным методом повышения отношения сигнал/СШ является пространственно-временная обработка сигналов [17], заключающаяся в пространственной декорреляции сигналов структурного шума за счет приема эхосигналов в N различных положениях приемного преобразователя на поверхности изделия с последующим накоплением (сложением) результатов N измерений. При этом расстояние d между соседними положениями ПП должно выбираться исходя из требования, что расстояние d должно быть не менее радиуса корреляции r_k структурного шума, при котором величина функции взаимной корреляции сигналов СШ в соседних положениях преобразователей близка к нулю. При выполнении условия $d \approx r_k$ сигналы структурного шума становятся взаимно декоррелированными, поэтому при сложении N сигналов суммарный структурный шум увеличивается не более чем в \sqrt{N} раз, эхосигнал от дефекта (от дна изделия) возрастает в N раз, а отношение сигнал/СШ увеличивается приблизительно в \sqrt{N} раз.

Обработка сигналов с помощью антенной решетки представляет собой один из вариантов пространственно-временной обработки сигналов, при которой N приемных преобразователей АР расположены на одной линии на расстоянии d друг от друга. Поэтому в томографах бетонных изделий шаг антенной решетки следует выбирать не из радиолокационного условия $d \approx \lambda/2$, а исходя из условия $d \approx r_k$ [14–17].

Тот факт, что алгоритм «фокусировка в точку» по-разному отображает пространственно протяженные (плоскостные) и пространственно локализованные (точечные) отражатели, приводит к ограничению в его применении в условиях высокого уровня структурного шума. Действительно, так как алгоритм «фокусировка в точку» ориентирован на отображение точечных отражателей и не ориентирован на отображение плоскостных отражателей, то он преимущественно отображает точечные структурные неоднородности бетона (например, зерна гравия) и в меньшей степени отображает дно ОК. Этот эффект иллюстрируется на рис. 3а, где показана модель сложноструктурного объекта контроля с дефектом (отверстием диаметром 50 мм) и с «точечными» отражателями (структурными неоднородностями) разной величины. На рис. 3б показана томограмма ОК, на которой адекватно отображены дефект и точечные неоднородности структуры, формирующие структурный шум. Дно изделия отображается коротким отрезком, который на фоне СШ обнаружить достаточно сложно. Таким образом, при использовании алгоритма «фокусировка в точку» снижается величина отношения донный сигнал/СШ и ограничивается надежно измеряемая толщина СК из-за того, что амплитуда донного сигнала уменьшается при высоком качестве отображения сигнала структурного шума.

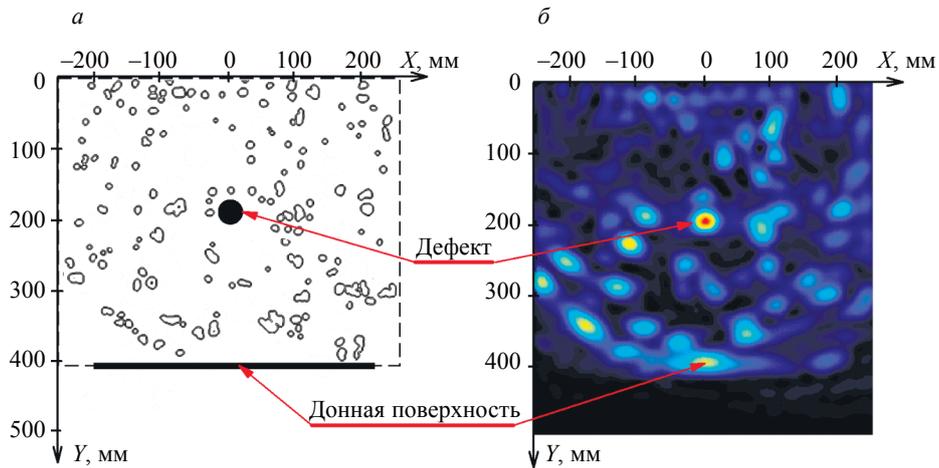


Рис. 3. Отображение структуры бетонного изделия с помощью алгоритма «фокусировка в точку»: *a* — случайное распределение элементов структуры; *б* — изображение элементов структуры и дна изделия (моделирование).

Показанный на рис. 3 результат моделирования подтверждается экспериментально. На рис. 4 приведены томограммы двух бетонных изделий с одинаковой структурой, но с разной толщиной (200 и 400 мм). Средний размер акустических неоднородностей составлял $\bar{D} \approx 20$ мм, скорость продольных волн ультразвука в бетоне $C \approx 3000$ м/с. Томограммы были построены при использовании зондирующего сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ сигнала) со средней частотой $f_0 = 200$ кГц, с девиацией частоты $\Delta f = 150$ кГц и с базой $B = T_c \Delta f \approx 150$. На средней частоте f_0 протяженность УЗ продольной волны $\lambda \approx 15$ мм. При таком соотношении \bar{D} / λ в бетонном изделии толщиной $H = 200$ мм дно СК фиксируется достаточно четко (*a*), а дно изделия толщиной 400 мм (*б*) определяется не однозначно, так как интенсивность отражений от точечных элементов структуры, формирующих структурный шум, существенно выше интенсивности отражения от дна. В результате соответствующая донному эхосигналу отметка светло-зеленого цвета при толщине изделия $H = 400$ мм едва заметна на фоне ШШ.

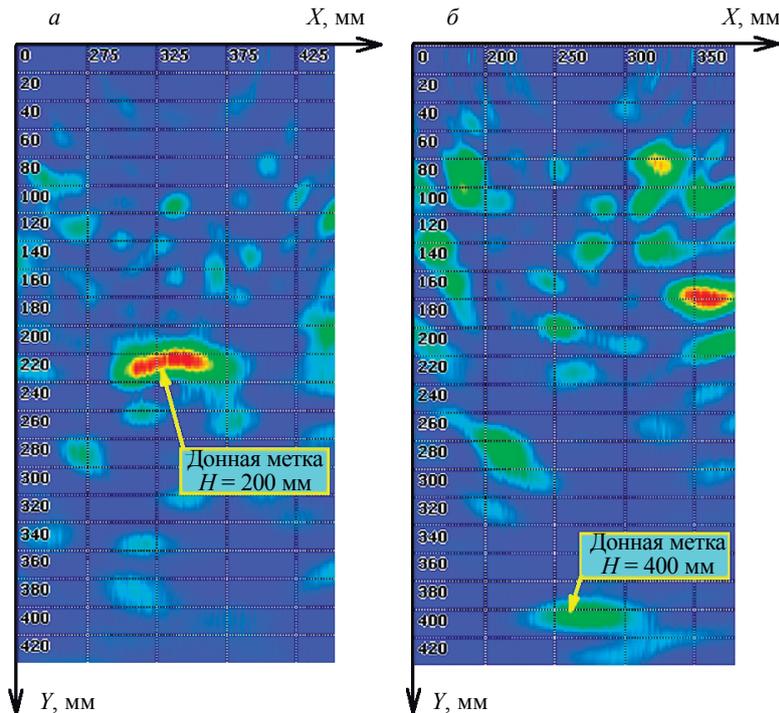


Рис. 4. Томограммы бетонных блоков толщиной 200 мм (*a*) и 400 мм (*б*) при использовании алгоритма «фокусировка в точку».

Тем самым, результаты эксперимента подтверждают сделанный выше вывод о том, что алгоритм «фокусировка в точку» имеет ограничение при измерении толщины крупногабаритных бетонных изделий с высоким уровнем структурного шума из-за различий в механизме формирования отраженного сигнала от плоскости и от пространственно локализованного точечного отражателя.

БЕЗЭТАЛОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ (ТОЛЩИНЫ) СК ИЗ БЕТОНА С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА «ФОКУСИРОВКА В ТОЧКУ»

Несмотря на указанное ограничение в использовании традиционного алгоритма «фокусировка в точку» при измерении толщины бетонных изделий с высоким уровнем СШ, этот алгоритм широко используется практически во всех известных томографах СК. Так как алгоритм «фокусировка в точку» позволяет обнаруживать технологические отверстия, дефекты и другие пространственно локализованные неоднородности структуры, то его целесообразно использовать для безэталонного измерения скорости ультразвука в бетоне в тех случаях, когда в крупногабаритных СК невозможно обнаружить отметку сигнала от дна, но при этом в изделии присутствуют технологические отверстия.

В предлагаемом нами безэталонном способе определения скорости ультразвука, основанном на использовании алгоритма «фокусировка в точку», анализируются трехмерные представления B -скана бетонного изделия (рис. 5), которые являются в данном случае более информативными, чем двумерные B -сканы.

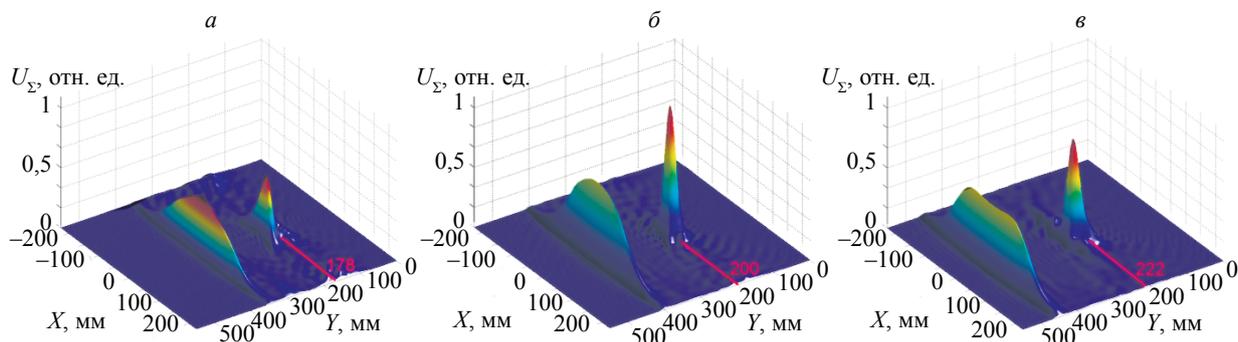


Рис. 5. Трехмерные B -сканы, построенные при различных значениях скорости продольных волн:
 a — $C_{L \text{ расч } 1} = 3500$ м/с; b — $C_{L \text{ расч } 2} = 4000$ м/с; v — $C_{L \text{ расч } 3} = 4500$ м/с (моделирование).

На трехмерных томограммах для изделия толщиной $H = 400$ мм «точечный» отражатель, расположенный глубине $h = 200$ мм, отображается пиком, высота которого соответствует амплитуде суммарного эхосигнала от точечного отражателя U_{Σ} . Одновременно на томограммах присутствует отметка образа дна, протяженность которого много меньше пространственного размера донной поверхности, а амплитуда отметки образа дна меньше амплитуды пика, отображающего «точечный» дефект. Поэтому преимущественной информативностью характеризуется пик, соответствующий точечному отражателю.

Процедура определения истинной скорости ультразвука следующая: по результатам одного измерения производится построение нескольких трехмерных B -сканов при различных значениях расчетной продольной скорости $C_{L \text{ расч}}$. С изменением расчетной скорости меняется амплитуда пика из-за изменения времени задержки поступающих на элементы АР (1) сигналов и из-за изменения условия когерентности при суммировании эхосигналов. Далее производится сравнительный анализ амплитуд всех пиков, отображающих «точечный» дефект, выбирается пик с наибольшей высотой и по трехмерному B -скану с максимальной амплитудой пика определяется истинная скорость ультразвука в бетоне, равная расчетной скорости УЗ волн для данной томограммы.

На рис. 5 показаны три B -скана, полученные для скоростей $C_{L \text{ расч } 1} = 3500$ м/с (a), $C_{L \text{ расч } 2} = 4000$ м/с (b) и $C_{L \text{ расч } 3} = 4500$ м/с (v), соответствующих бетонам различных марок. Анализ трехмерных изображений показывает, что пик, отображающий «точечный» дефект, имеет наибольшую амплитуду при значении расчетной скорости $C_{L \text{ расч } 2} = 4000$ м/с. Однако для точного опре-

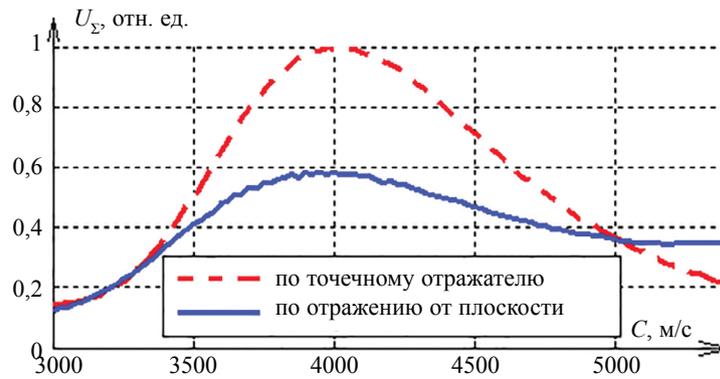


Рис. 6. Зависимость амплитуды эхосигнала от скорости продольных УЗ волн для «точечного» отражателя (штриховая линия) и для плоскостного отражателя (сплошная линия).

деления истинной скорости УЗК трех *B*-сканов недостаточно, поэтому следует построить достаточно большое число трехмерных томограмм, по которым затем строится зависимость изменения амплитуды пика от значений расчетной скорости УЗ волн. Такая зависимость для того же бетонного блока ($H = 400$ мм, $h = 200$ мм) показана на рис. 6 (штриховая кривая). По максимуму зависимости $U_{\Sigma}(C)$ легко определяется скорость ультразвука в бетоне $C_L = 4000$ м/с, а по соответствующей трехмерной томограмме (рис. 5б) устанавливают истинные координаты дефекта ($h = 200$ мм, $x = 0$ мм). Тем самым, предложенный безэталонный способ позволяет измерять скорость ультразвука в изделиях, в которых заранее известно о наличии точечного отражателя (например, технологического отверстия).

На том же графике показана зависимость амплитуды отметки образа донной поверхности от расчетной скорости (сплошная кривая). Если в ОК «точечный» отражатель отсутствует, но при этом удастся зафиксировать донный сигнал, то возможно безэталонное определение скорости ультразвука и по отражению от дна изделия. Однако из-за того, что алгоритм «фокусировка в точку» ориентирован на обнаружение «точечных» отражателей, а плоскостные отражатели фиксируются плохо, максимум зависимости амплитуды донного сигнала от скорости ультразвука выражен менее четко по сравнению с аналогичной зависимостью для амплитуды эхосигнала от «точечного» дефекта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО БЕЗЭТАЛОННОМУ ИЗМЕРЕНИЮ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА «ФОКУСИРОВКА В ТОЧКУ»

На рис. 7—9 приведены результаты измерения скорости поперечных волн с помощью алгоритма «фокусировка в точку» в плоскопараллельном бетонном блоке толщиной $H = 400$ мм с распо-

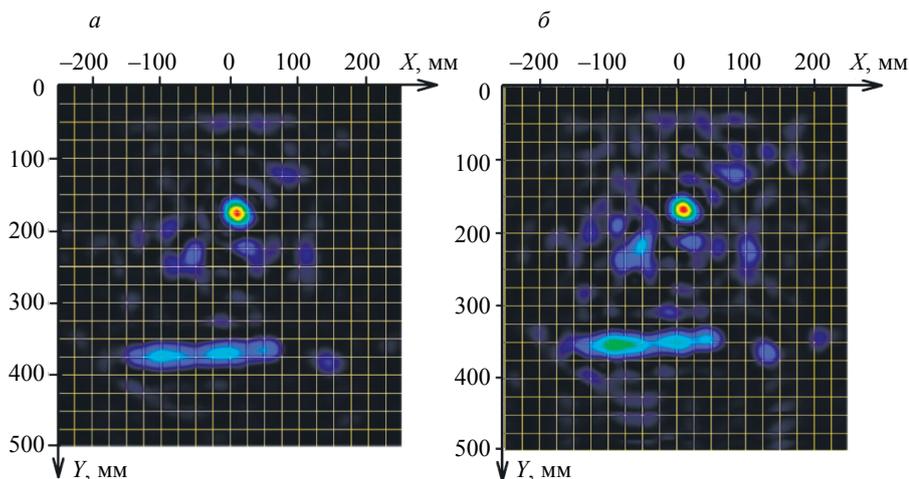


Рис. 7. Измерение скорости поперечных УЗ волн по скорости поверхностных УЗ волн в двух соседних положениях АР на поверхности бетонного блока: $C_{r1} = 1600$ м/с (а); $C_{r2} = 1550$ м/с (б).

ложенным на расстоянии $h = 200$ мм цилиндрическим отверстием диаметром 50 мм. Бетон имеет относительно однородную структуру ($\bar{D} \approx 10$ мм) и, тем самым, невысокий уровень СШ. Поверхность изделия неровная, из-за чего измерение объемной скорости способом, основанным на измерении скорости поверхностной волны, приводит к неоднозначным результатам.

Измерения проводили с помощью разработанного в МЭИ УЗ НЧ томографа с 12-элементной антенной решеткой, каждый элемент которой образован четырьмя преобразователями поперечных УЗ волн с сухим точечным контактом [18]. Каждый элемент АР представляет собой отдельный, функционально законченный модуль, содержащий ЦАП, излучающий усилитель мощности, четыре включенных параллельно преобразователя поперечных УЗ волн с сухим точечным контактом, входной усилитель и АЦП.

В эксперименте использовались широкополосные зондирующие ЛЧМ сигналы со средней частотой $f_0 = 50$ кГц и с базой $B = T_c \Delta f \approx 150$ с последующей их оптимальной фильтрацией (сжатием эхосигналов по времени в B раз). Обработка сигналов АР, построение томограмм, вычисление скорости ультразвука и определение координат дефектов и габаритов изделий проводилось с помощью УЗ адаптивного многофункционального измерительного устройства [19]. Измеренные значения координат с точностью до третьего знака автоматически выводятся на экран томографа. Несмотря на сложные многозвенные алгоритмы обработки УЗ частотно-модулированных эхосигналов время построения томограмм не превышает нескольких секунд.

На первом этапе скорость объемной поперечной волны определялась по измеренной скорости поверхностной волны. При измерении скорости в двух соседних положениях АР на неровной поверхности бетонного блока были получены два различных значения. Первое измерение определило скорость поперечной УЗ волны $C_{11} = 1600$ м/с. Соответствующая двумерная томограмма показана на рис. 7а, на которой отчетливо видна отметка цилиндрического отверстия ($h_1 \approx 175$ мм) и менее четко определяется донная поверхность на глубине $H_1 = 373$ мм, что не соответствует известной заранее толщине $H = 400$ мм. С помощью второй томограммы (рис. 7б) получены значения $C_{12} = 1550$ м/с, $h_2 \approx 160$ мм, $H_2 = 362$ мм. В результате погрешность определения координат отверстия (разница между полученными и реальными координатами) составила 6,8 и 9,5 % соответственно.

Столь большая погрешность объясняется тем, что при измерении объемной скорости по скорости поверхностной волны источником погрешности в определении координат дефектов и размеров изделия являются физико-механические характеристики поверхностного слоя бетона. Поэтому на следующем этапе для устранения влияния качества поверхности изделия на точность построения томограмм определялась объемная скорость ультразвука в бетоне с помощью предлагаемого безэталонного способа измерения скорости УЗ волн, основанного на использовании алгоритма «фокусировка в точку».

Для этого курсор устанавливался на изображении точечного отражателя, далее осуществляли цикл контроля изделия, после чего в вычислительном устройстве проводили расчет трехмерных томограмм, соответствующих различным значениям скорости УЗ поперечных волн в пределах $C_t = (1300—2300)$ м/с. Для увеличения точности измерения при построении томограмм был выбран относительно небольшой шаг изменения расчетной скорости $\Delta C_{t \text{ расч}} = 10$ м/с, что потребовало вычисления 100 трехмерных томограмм. При этом последовательно

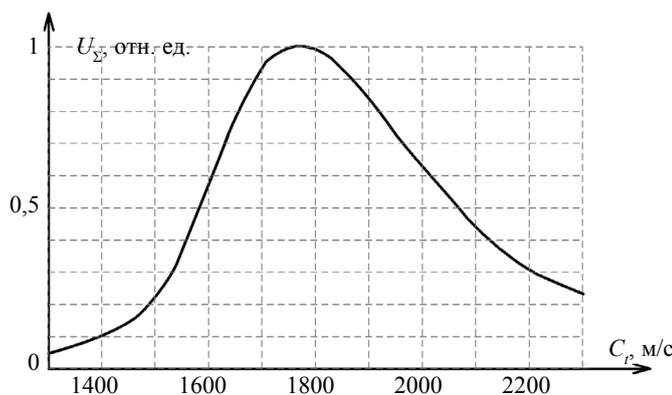


Рис. 8. График зависимости амплитуды отраженного сигнала от скорости УЗ волн в изделии.

измеряли амплитуды отметки образа цилиндрического отверстия и осуществляли построение графика зависимости амплитуды отметки образа точечного отражателя от значения скорости УЗ волн в бетоне (рис. 8). По максимуму амплитуды зависимости $U_{\Sigma}(C_i)$ определяли реальную скорость УЗК $C_{i3} = 1750$ м/с.

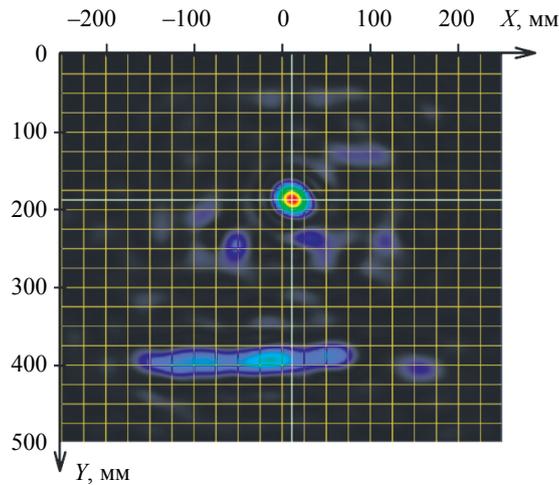


Рис. 9. Томограмма, полученная при скорости УЗ волн $C_3 = 1750$ м/с.

На рис. 9 показана двухмерная томограмма, построенная для реальной скорости УЗ волн в бетоне $C_{i3} = 1750$ м/с. На томограмме отметка образа цилиндрического отверстия расположена на расстоянии 190 мм; донная поверхность располагается на расстоянии $H_4 = 395$ мм. Тем самым точность измерения толщины изделия увеличивается по сравнению с результатом, полученным по томограммам, показанным на рис. 7.

Таким образом, результаты экспериментов подтверждают высокую точность предложенного безэталонного способа определения одновременно скорости ультразвука в бетоне и координат точечного отражателя с помощью алгоритма «фокусировка в точку».

ВЫВОДЫ

Безэталонный способ определения скорости ультразвука в строительных конструкциях из бетона, реализуемый с помощью алгоритма обработки сигналов ультразвуковой фазированной антенной решетки «фокусировка в точку», позволяет повысить точность измерения скорости по сравнению с известным способом измерения скорости объемных волн по поверхностной волне. Большая точность обеспечивается благодаря тому, что исключается причина возникновения погрешности: измерение скорости продольных (поперечных) волн осуществляется в объеме изделия и состояние поверхности бетона не влияет на измеренную скорость.

Так как алгоритм обработки сигналов «фокусировка в точку» ориентирован на отображение точечных отражателей, то предложенный способ безэталонного измерения скорости ультразвука в бетоне следует использовать при наличии в строительной конструкции опорного точечного отражателя (технологического отверстия), размеры которого должны превышать размеры структурных неоднородностей, что обеспечивает возможность обнаружения отверстия на фоне структурного шума.

Предложенный способ реализуется посредством построения набора трехмерных томограмм для различных значений расчетной скорости ультразвука, измерения амплитуды эхосигнала от дефекта для каждой томограммы, построения зависимости амплитуд эхосигналов от значения расчетной скорости $U_{\Sigma}(C)$ и определения максимальной амплитуды эхосигнала по характеристике $U_{\Sigma}(C)$. Расчетная скорость для томограммы с максимальной амплитудой эхосигнала от отражателя является истинной скоростью ультразвука в бетонном изделии, координаты же эхосигнала от отверстия на данной томограмме соответствуют истинным координатам отверстия. Таким образом, с помощью предложенного способа проводятся одновременно определение скорости УЗК в бетоне и координат отражателя, а также измерение толщины бетонного изделия.

Статья подготовлена в рамках выполнения Государственного задания № 11.9879.2017/8.9 Минобрнауки России в сфере научной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль / Справочник: В 7 т. Под общей редакцией В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
2. ASTM C597 — 16 Standard: Test Method for Pulse Velocity Through Concrete // Book of Standards Volume 04.02. <http://www.astm.org/Standards/C597.htm>
3. Shevaldykin V.G., Kozlov V.N., Samokrutov A.A. Inspection of Concrete by Ultrasonic Pulse-Echo Tomograph with Dry Contact / 7th European conference on Non-Destructive Testing, Copenhagen, 26—29 May, 1998. NDTnet, August 1998. V. 3. No. 8. <http://www.ndt.net/abstract/ecndt98/131.htm>
4. Schickert M., Krause M., Müller W. Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique // J. of Materials in Civil Engineering. 2003. No. 15. P. 235—246.
5. Бутенко А.И., Шкарлет Ю.М. О некоторых возможностях ультразвуковой безэталонной толщинометрии / Тезисы докл. VII Всесоюзной конференции по неразрушающему контролю. Киев, 1974. С. 198—200.
6. Korolev M.V., Karpelson A.E., Shevaldykin V.N. Ultrasonic Thickness Gaging Standards in USSR / Proceedings of Tenth World Conference on Non-destructive Testing. M., 1982. V. 2. P. 50—59.
7. Carodiskey T.J., Meyer P.A. Thickness Measurement in Materials of Unknown Acoustic Velocity. NDTnet. October 1997. V. 2. No. 10. <http://www.ndt.net/article/wt1097/caro2/caro2.htm>
8. Королев М.А., Шевалдыкин В.Г., Карпельсон А.Е. Ультразвуковой безэталонный толщиномер. Авторское свидетельство СССР № 10290007 // Бюл. изобр. № 26. 1983.
9. Королев М.В., Карпельсон А.Е., Шевалдыкин В.Г., Стариков Б.П. Способ ультразвуковой безэталонной толщинометрии. Авторское свидетельство СССР SU1221489 А // Бюл. изобр. № 12. 1986.
10. Titov S.A., Maev R.G., Bogachenkov A.N. Measuring the acoustic wave velocity and sample thickness using an ultrasonic transducer array // Tech. Phys. Lett. 2009. V. 35. P. 1029. <https://doi.org/10.1134/S1063785009110170>
11. Базулин Е.Г., Исмаилов Г.М. Одновременное измерение скорости ультразвуковой поперечной волны и толщины объекта контроля с плоскопараллельными границами с использованием двух антенных решеток // Дефектоскопия. 2013. № 8. С. 20—34.
12. Качанов В.К., Соколов И.В., Концов Р.В., Сеницын А.А. Использование антенных решеток для безэталонного измерения скорости ультразвука и толщины бетонных изделий // Дефектоскопия. 2017. № 1. С. 26—33.
13. Schickert M. Towards SAFT-Imaging in Ultrasonic Inspection of concrete / International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, 26—28.09.1995. P. 411—418.
14. Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая дефектоскопия бетона эхометодом: состояние и перспективы // В мире неразрушающего контроля. 2002. № 2 (16). С. 6—10.
15. Качанов В.К., Соколов И.В., Туркин М.В., Шалимова Е.В., Тимофеев Д.В., Конов М.М. Особенности применения метода «фокусировка в точку» при ультразвуковой томографии изделий из сложноструктурных материалов // Дефектоскопия. 2010. № 4. С. 30—44.
16. Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Воронкова Л.В., Шалимова Е.В. Структурный шум в ультразвуковой дефектоскопии. М.: Изд. дом МЭИ, 2016. 186 с. ISBN 978-5-383-01069-3.
17. Карташев В.Г., Качанов В.К., Шалимова Е.В. Основные положения теории пространственно-временной обработки сигналов применительно к задачам ультразвуковой дефектоскопии изделий из сложноструктурных материалов // Дефектоскопия. 2010. № 4. С. 19—29.
18. Шевалдыкин В.Г., Самокрутов А.А., Козлов В.Н. Ультразвуковые низкочастотные пьезопреобразователи с сухим точечным контактом и их применение для неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2003. № 2. С. 30—39.
19. Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Концов Р.В., Федоров М.Б. Ультразвуковая адаптивная многофункциональная дефектоскопия. М.: Изд. дом МЭИ, 2015. 175 с. ISBN 978-5-383-00968-0.