

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АДАПТИВНЫЙ ТОМОГРАФ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ С НЕСТАНДАРТНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ

© 2021 г. В.К. Качанов<sup>1,\*</sup>, И.В. Соколов<sup>1</sup>, Р.В. Концов<sup>1</sup>, М.Б. Федоров<sup>1</sup>, В.В. Первушин<sup>1</sup>

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

Поступила в редакцию 13.10.2021; после доработки 22.11.2021  
Принята к публикации 23.11.2021

Показано, что для ультразвуковой томографии бетонных строительных конструкций с нестандартной конфигурацией поверхности следует использовать ультразвуковые адаптивные антенные решетки, позволяющие принимать форму неплоской поверхности контролируемого изделия. Также следует применять адаптивные методы ультразвуковой томографии, позволяющие одновременно определять координаты дефектов и скорость ультразвуковых колебаний в бетоне и подстраивать параметры зондирующих сигналов под характеристики бетонных изделий.

*Ключевые слова:* ультразвуковая томография изделий из бетона, адаптивная антенная решетка, безэталонный способ определения скорости ультразвуковых волн, алгоритм «фокусировка в точку».

**DOI:** 10.31857/S0130308221120022

### ПРОБЛЕМА КОНТРОЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ БЕТОНА С НЕСТАНДАРТНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ

С помощью одноканальных приборов ультразвукового (УЗ) эхо-импульсного контроля не удается контролировать строительные конструкции (СК) толщиной более 1 м из-за аномально большого интегрального затухания ультразвука в крупногабаритных СК из бетона [1]. Поэтому для контроля изделий из бетона в последние годы используют УЗ томографы с фазированными антенными решетками (АР) [2—6].

В УЗ томографии изображение контролируемого изделия осуществляется с использованием алгоритма «фокусировка в точку», при котором с помощью АР производится фокусировка УЗ луча последовательно в каждую  $j$ -ю точку изделия [7]. Построение изображения изделия осуществляется посредством последовательного излучения каждым элементом антенны УЗ зондирующего сигнала, который проходит путь  $L_{\Sigma j} = L_{\text{изл}} + L_{\text{отр}j}$ , состоящий из пути  $L_{\text{изл}}$  от излучающего преобразователя (ИП) до  $j$ -й точки изделия и пути  $L_{\text{отр}j}$  от отражателя в  $j$ -й точке до каждого приемного преобразователя (ПП) антенны. Время задержки сигналов  $T_{\text{зад}j}$  для каждой  $j$ -й точки изделия (для каждого канала) определяется по времени прохождения импульса от ИП до дефекта и далее до каждого ПП антенны:  $T_{\text{зад}j} = L_{\Sigma j} / C = (L_{\text{изл}} + L_{\text{отр}j}) / C$  (где  $C$  — скорость ультразвука в бетоне). При наличии в  $j$ -й точке отражателя (дефекта или акустической неоднородности) после когерентного суммирования сигналов во всех каналах формируется импульс с амплитудой  $U_{\Sigma j}$ . При отсутствии отражателя амплитуда эхосигнала, отраженного от  $j$ -й точки, равна нулю. Аналогично проводится последовательная фокусировка УЗ сигналов в каждую точку объекта контроля, а затем по совокупности эхосигналов, отраженных от всех точек изделия, строится томограмма объекта контроля (ОК).

Принцип построения УЗ линейных АР позаимствован у радиолокационных антенн, у которых расстояние между  $n$  элементами решетки  $d$  составляет примерно половину длины волны  $\lambda$  электромагнитных колебаний, а зондирующие импульсы представляют собой гармонические сигналы с фиксированной частотой. Так как скорость электромагнитных колебаний неизменна, то в радиолокационных антеннах обеспечивается неизменное соотношение  $d/\lambda \approx 0,5$ , которое позволяет осуществлять когерентное суммирование парциальных гармонических сигналов и формировать диаграмму направленности (ДН) антенн с минимальным уровнем боковых лепестков [8, 9].

В отличие от радиолокации скорость ультразвука в различных изделиях из бетона разная. Поэтому при контроле СК следует предварительно определять значение скорости ультразвука для данной марки бетона. Кроме того, из-за разброса скоростей в бетонных ОК сложно реализовать условие  $d/\lambda \approx 0,5$  при жесткой конструкции УЗ линейной АР с постоянным шагом  $d$  (например, в УЗ томографе А1040 MIRA шаг АР фиксирован и равен  $d = 30$  мм [10]). Из-за этого в ДН

УЗ антенны присутствуют боковые лепестки, ухудшающие качество изображения СК в области, расположенной с боку от АР. Поэтому в УЗ томографах ограничивают угол обзора АР областью, расположенной под АР.

Все существующие УЗ томографы СК из бетона ориентированы на контроль изделий с плоской поверхностью (стен, перекрытий зданий, дорожных покрытий, фундаментов и др.), которые можно назвать изделиями со стандартной конфигурацией поверхности. АР таких томографов «работают» по принципу «совмещенного» пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), когда один и тот же ПЭП (одна и та же АР) и излучает зондирующий импульс и принимает эхо-сигнал. Однако с помощью таких традиционных УЗ томографов не удастся контролировать СК с нестандартной (неплоской) конфигурацией поверхности. Ниже приведен ряд таких нестандартных объектов.

Во-первых, это широко распространенные СК типа «соединение двух стен», которые образуют поверхности типа «внутренний угол» (рис. 1а, б). В этом случае существует проблема поиска дефектов, находящихся в области стыка двух стен. С помощью традиционных АР такой дефект обнаружить не удастся из-за ограниченного угла обзора антенны. Поэтому для контроля подобных СК следует использовать АР с относительно большим углом наклона УЗ луча при использовании двух отдельных АР (а) или одной АР (б). При наличии двух АР возможно их использовать в различных режимах: как «излучающая» (АР1) и «приемная» (АР2), или в режиме своеобразной «совмещенной» АР, когда обе части и излучают и принимают УЗ сигналы. Контролю таких угловых соединений посвящена статья [11], где показывается, что при боковом излучении оптимальный шаг АР уменьшается:  $d \approx 0,4\lambda$ . Если же шаг АР больше оптимального, то при таком наклонном излучении отношение сигнал/структурный шум уменьшается, структурный шум возрастает, что ограничивает возможность обнаружения дефекта в угловой зоне СК из сложно-структурного бетона.

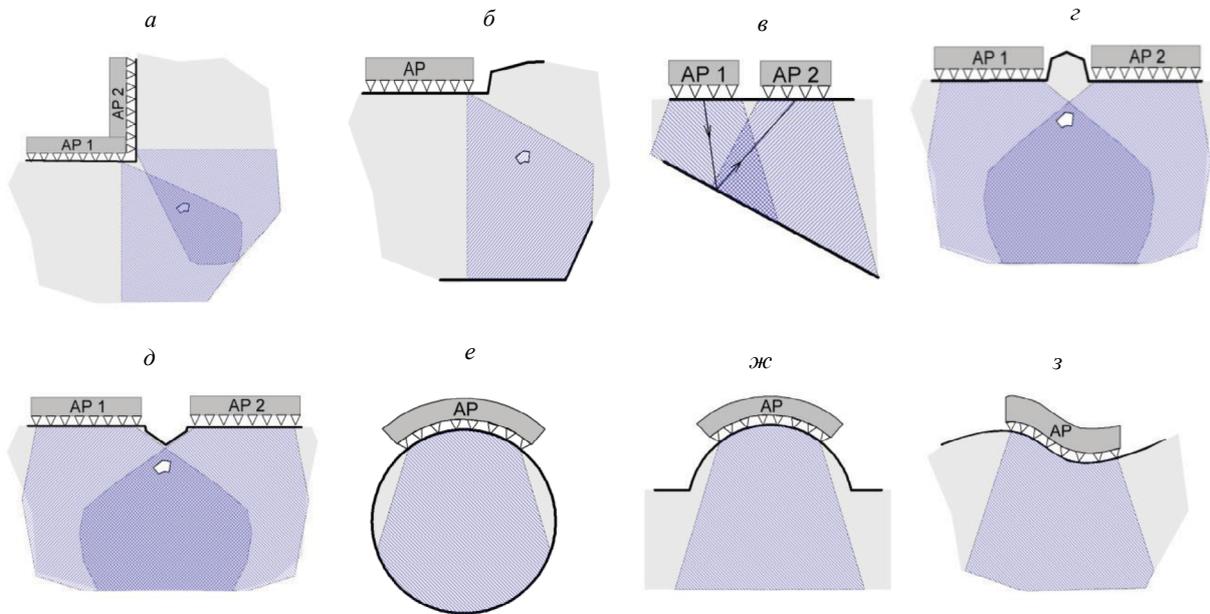


Рис. 1. Примеры нестандартных СК:

а — угловое соединение двух стен; б — наличие выступа на стене; в — СК с отражающей поверхностью, расположенной под углом к плоскости контроля; з — СК с наличием выступа на поверхности; д — СК с наличием впадины; е — колонна; ж — полуколонна; з — СК с произвольной формой поверхности.

Во-вторых, к нестандартным объектам контроля следует отнести изделия, у которых поверхность отражения не параллельна поверхности контроля. Из схемы на рис. 1в видно, что и в этом случае необходимо обеспечить наклонное излучение УЗ сигнала, так как иначе при использовании «совмещенной» АР с ограниченной апертурой не всегда возможно зафиксировать зеркально отраженные сигналы от плоскостей, расположенных под большим углом к плоскости контроля. В [12]

мы показали, что для обнаружения отраженного от наклонного дна эхосигнала следует использовать предложенный в МЭИ алгоритм работы УЗ ФАР «фокусировка на плоскость», при котором АР разделена на две отдельные АР (излучающую (АР1) и приемную (АР2)), что предполагает создание иного алгоритма работы УЗ томографа.

В-третьих, к СК с нестандартной конфигурацией следует отнести изделия, у которых на плоской поверхности имеются выступы ( $\varepsilon$ ) или впадины ( $\delta$ ). В этом случае следует использовать две отдельные АР, т.к. «совмещенную» АР невозможно разместить над дефектным местом.

В-четвертых, это изделия типа колонна ( $\varepsilon$ ) или полуколонна ( $\varepsilon$ ). Очевидно, что в этих случаях необходима разработка АР, форма которой принимает форму круглой или овальной поверхности СК.

В-пятых, это разнообразные бетонные изделия с неплоскими поверхностями, которые получили широкое распространение по мере развития строительства зданий из монолитного бетона ( $\varepsilon$ ).

Для контроля каждой такой нестандартной СК необходима разработка отдельной или раздельно-совмещенной АР, форма которой принимает форму поверхности изделия, однако заранее предугадать форму таких нестандартных объектов контроля достаточно сложно. Поэтому, учитывая большое разнообразие возможных форм СК из бетона, целесообразно для решения указанных задач разрабатывать не индивидуальное устройство для каждой новой конфигурации СК, а создавать универсальный томограф с адаптивной антенной решеткой, принимающей форму того или иного ОК. При этом одновременно необходимо разрабатывать адаптивные методы УЗ контроля, осуществляющие адаптацию зондирующих сигналов под параметры АР и характеристики контролируемого изделия, а также создавать соответствующее оборудование и специализированное программное обеспечение (ПО), с помощью которого осуществляется построение томограмм изделий.

### РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ МЕТОДОВ УЗ ТОМОГРАФИИ ИЗДЕЛИЙ С НЕСТАНДАРТНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ

В основу разработки адаптивных методов УЗ контроля нами был положен метод адаптации зондирующего сигнала, используемый при безэталонном определении одновременно скорости ультразвука в бетоне и координат дефекта в изделии. В последние годы проблемам безэталонного контроля изделий уделяется много внимания [13, 14], в нашем случае для безэталонной томографии использовался алгоритм «фокусировка в точку» [7], с помощью которого осуществлялось зондирование бетонного плоскопараллельного блока толщиной  $H = 400$  мм с отверстием диаметром 40 мм на глубине  $h = 200$  мм УЗ сигналами с фиксированной частотой  $f = 100$  кГц при расположении АР непосредственно над дефектом. С помощью алгоритма «фокусировка в точку» в вычислительном устройстве производилось построение большого количества трехмерных томограмм (порядка  $k \approx 10^2$ ), построенных при различных значениях расчетной скорости  $C_{\text{расч}}$ . Далее для всех построенных томограмм определялись амплитуды пиков и их координаты, а затем находилась томограмма с наибольшей амплитудой эхосигнала от дефекта  $U_{\Sigma}$ . На рис. 2 показаны

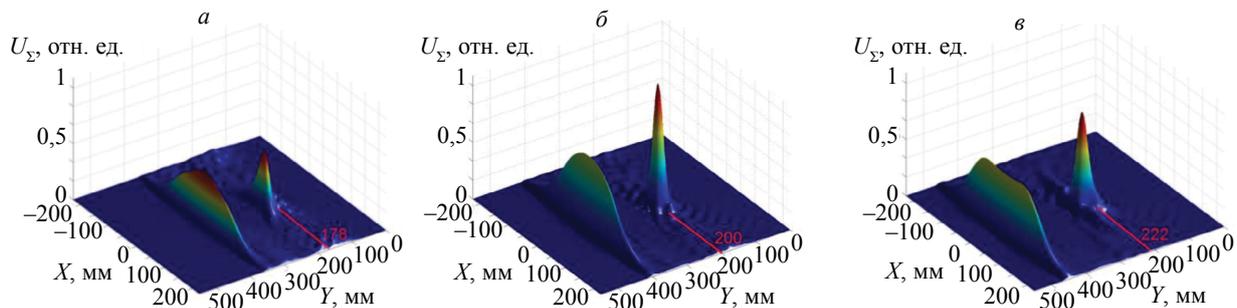


Рис. 2. Томограммы, представленные в виде графиков трехмерной поверхности, построенные при различных значениях расчетной скорости акустических колебаний:

$a$  —  $C_{\text{расч},a} = 3500$  м/с;  $b$  —  $C_{\text{расч},b} = 4000$  м/с;  $v$  —  $C_{\text{расч},v} = 4500$  м/с (моделирование).

только три томограммы, построенные для разных значений расчетной скорости ультразвуковых продольных волн  $C_{\text{расч.}a} = 3500$  м/с (а);  $C_{\text{расч.}b} = 4000$  м/с (б) и  $C_{\text{расч.}в} = 4500$  м/с (в). На каждой из томограмм четко виден пик  $U_{\Sigma}$ , соответствующий точечному дефекту, при этом на томограмме, показанной на рис. 2б, амплитуда пика максимальная. Поэтому по этой томограмме определялось значение скорости УЗ волн в бетонном изделии  $C = 4000$  м/с, а затем по этой же томограмме устанавливались координаты дефекта ( $h = 200$  мм) [7].

Достоверность полученных значений скорости ультразвука и координат дефекта поясняется принципом формирования сигнала  $U_{\Sigma}$ , который заключается в когерентном суммировании парциальных эхосигналов, поступающих на все элементы антенны. При неизменной частоте УЗ сигнала  $f$  и при использовании АР с неизменным шагом решетки  $d$  максимум просуммированного сигнала определяется величиной скорости УЗ колебаний в бетоне  $C = \lambda f$ . Это означает, что в данном примере именно при скорости ультразвука  $C = 4000$  м/с возникают оптимальные условия для синфазного сложения парциальных сигналов и, тем самым, для формирования максимальной амплитуды суммарного сигнала  $U_{\Sigma}$ . При иных значениях скорости амплитуда эхо-сигнала от дефекта и координаты пика существенно изменяется: из томограмм на рис. 2 видно, что при отклонении скорости ультразвука в бетоне от реального значения  $C = 4000$  м/с на 12 % координаты отверстия изменяются на 12 %, а амплитуда полезного сигнала уменьшается на  $\approx 6$  дБ.

Достоинство рассмотренного адаптивного метода томографии заключается не только в возможности безэталонного измерения одновременно скорости ультразвука и координат дефекта при фиксированном шаге АР и при неизменной частоте зондирующего сигнала, но и в том, что он позволяет производить адаптивную подстройку частоты сигнала в условиях структурного шума и частотно-зависимого затухания ультразвука. Однако для реализации такого адаптивного метода томографии необходима соответствующая аппаратура, позволяющая производить подстройку частоты.

Тем самым, с помощью рассмотренного адаптивного безэталонного метода возможно производить адаптацию параметров контроля для поиска дефектов, расположенных в СК с нестандартной конфигурацией, — определять скорость ультразвука или подбирать оптимальную частоту зондирующего сигнала. Такая адаптация параметров сигнала (выбор оптимальной скорости звука) была использована в УЗ томографе, предназначенном для обнаружения дефектов, расположенных в угловой зоне соединения двух стен [11] при использовании раздельно-совмещенной «угловой» антенной (рис. 3а). В антенне использовались УЗ широкополосные ПЭП с сухим точечным контактом, работающие на поперечных типах волн с центральной частотой 50 кГц. Дефект представляет собой цилиндрическое отверстие диаметром 50 мм, расположенное вблизи ребра двугранного угла на расстоянии 200 мм от каждой из стенок. На рис. 3б приведена схема контроля углового соединения (а), при которой излучают и принимают эхосигналы обе «половинки» угловой антенны. На рис. 3в показана томограмма угловой зоны двух стен, на которой четко фиксируется дефект, который не удастся обнаружить при использовании стандартной АР с плоской поверхностью.

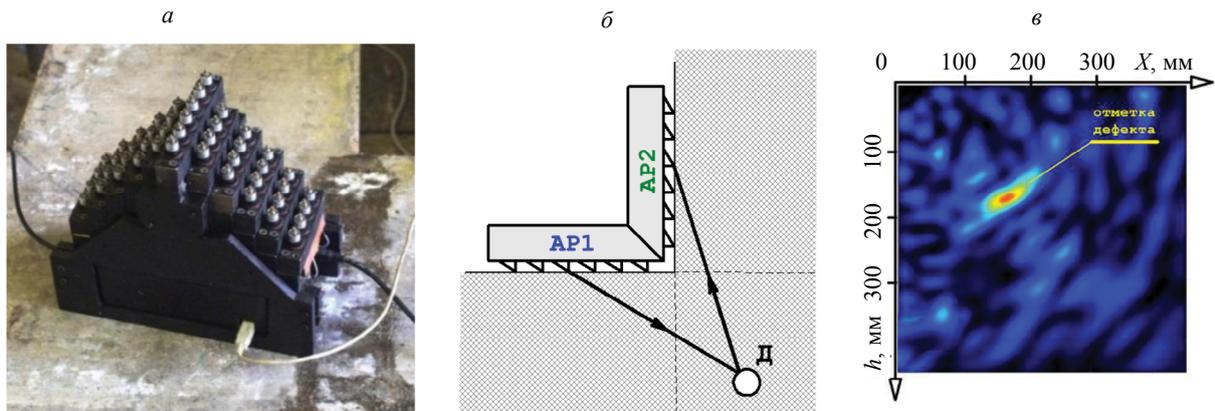


Рис. 3. Обнаружение дефекта в угловой зоне соединения двух стен с помощью угловой раздельной антенны: а — угловая антенна для контроля изделий типа «внутренний угол»; б — схема контроля обеими «половинками» антенны; в — двухмерная томограмма изделия [11].

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АДАПТИВНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ДЛЯ ТОМОГРАФИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С НЕПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Так как при контроле СК с неплоской поверхностью невозможно использование традиционной АР с плоской поверхностью, то нами была разработана УЗ адаптивная АР, форма которой определяется формой поверхности СК. Адаптивная АР состоит из звеньев, показанных на рис. 4а, каждое из которых состоит из двух элементов, а каждый элемент состоит из 4-х ПЭП с сухим точечным контактом (СТК) [15]. Необходимость параллельного соединения 4-х ПЭП с СТК вызвана необходимостью обеспечить должную ширину ДН звена в направлении, перпендикулярном плоскости визуализации (плоскости сканирования). ПЭП с СТК работают на поперечных типах волн с центральной частотой  $f_0 = 50$  кГц, которая определяет среднюю частоту зондирующего широкополосного сигнала. Звенья АР соединяются гибкими шарнирами, они подвижны в двух осях (рис. 4б). Такое соединение позволяет обеспечить поворот блоков вокруг двух осей и прижатие АР как к внешнему, так и к внутреннему углам СК.

На рис. 4в, г изображены возможные конфигурации подвижного соединения двух блоков АР — угол раскрытия АР составляет до  $120^\circ$  как внутрь, так и наружу. На рис. 4д показаны пространственные положения элементов АР, обеспечивающие прижатие АР к СК различной конфигурации. Для обеспечения качественного прижатия АР к поверхности СК использовалась силиконовая прокладка. Каждое звено адаптивной АР в УЗ адаптивном томографе, изготовленном в ООО «КБ СА Лагрон плюс», представляет собой отдельный модуль, содержащий усилитель, ЦАП и АЦП.

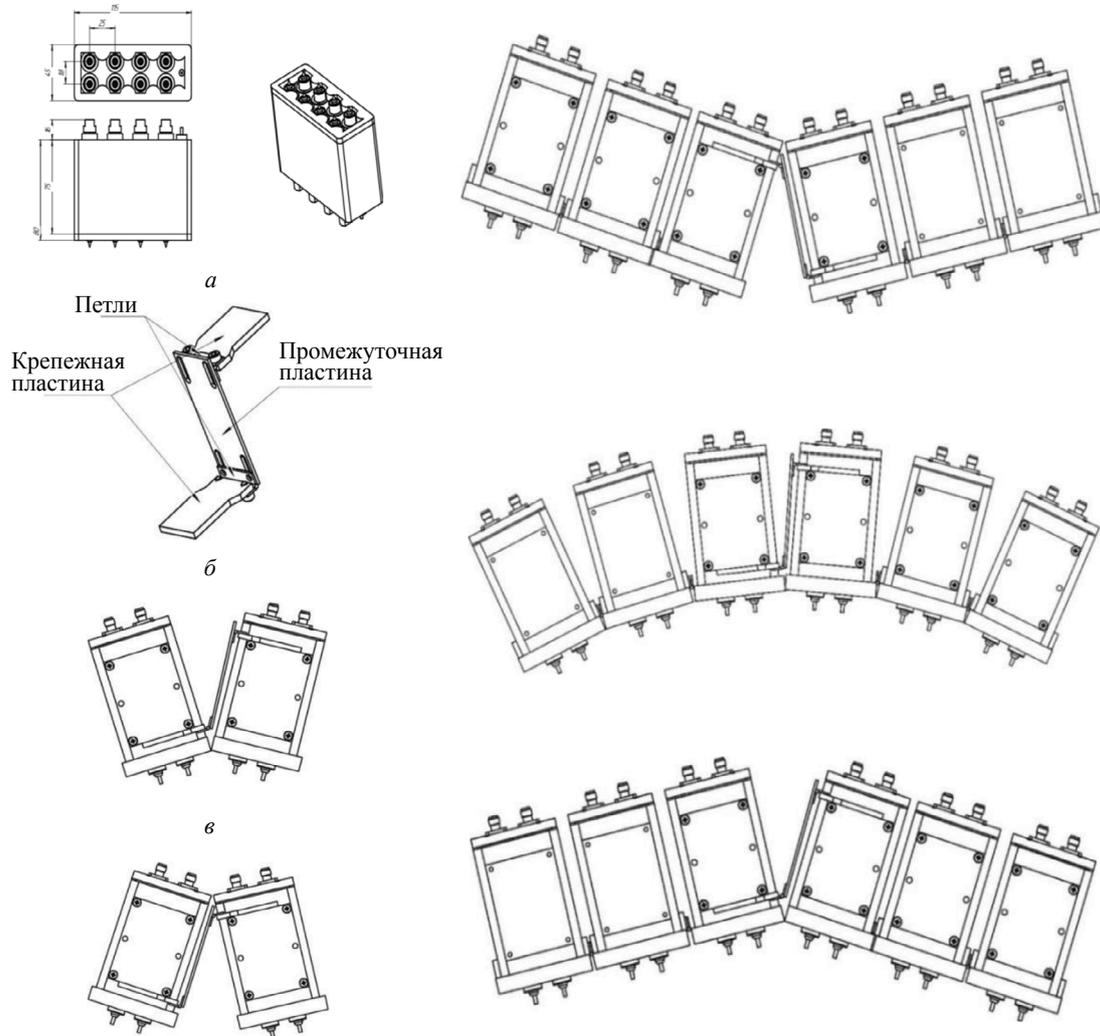


Рис. 4. Элементы адаптивной антенной решетки: а — звено АР с 8 ПЭП; б — элемент подвижного соединения звеньев; в, г — различные конфигурации подвижного блока АР; д — различные конфигурации АР.

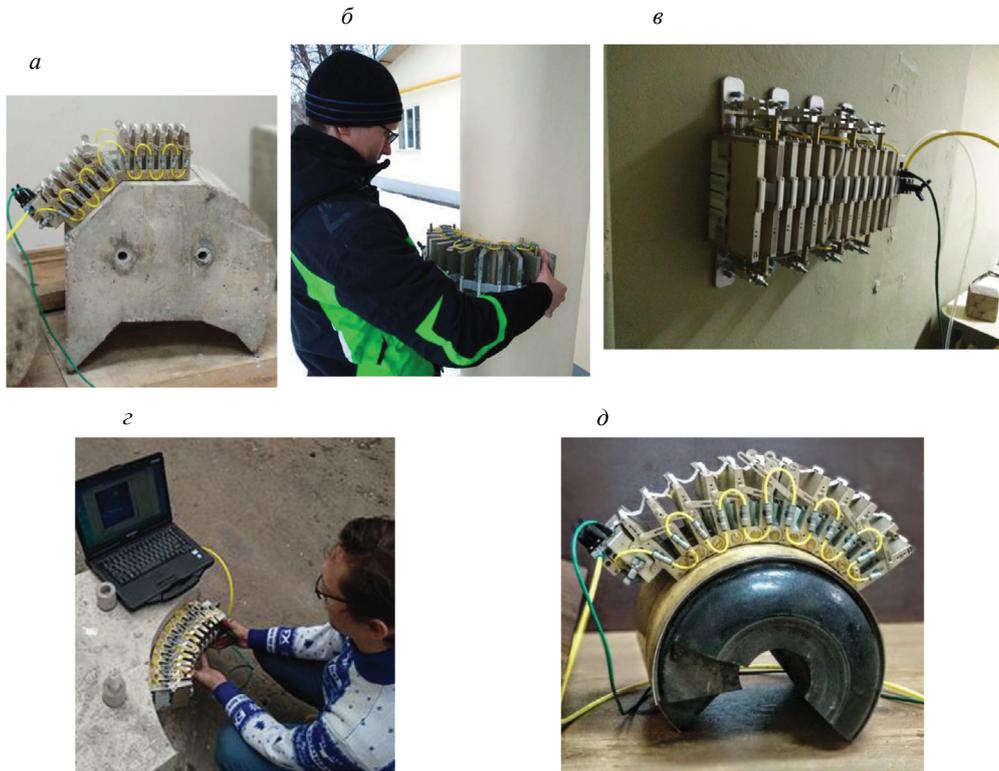


Рис. 5. УЗ томография различных по форме СК:

*a* — с выпуклой; *б* — с цилиндрической поверхностью бетонного изделия; *в* — пневматический прижим АР УЗ томографа к вертикальной стене; *г* — контроль СК с вогнутой поверхностью; *д* — контроль изделия из полимерных материалов.

В адаптивном томографе возможен как ручной прижим АР к неровной поверхности бетона, так и автоматический прижим. Пример прижатия адаптивной АР в ручном режиме к поверхности СК выпуклой и круглой формы показан на рис. 5*a*, *б*, *г*. Кроме того, имеется возможность пневматического прижима адаптивной АР к вертикальным стенам (рис. 5*в*).

Адаптивная АР является неотъемлемой частью УЗ адаптивного томографа, созданного на базе разработанного в МЭИ многофункционального измерительного комплекса (ИК) [16]. ИК состоит из ПК, модулей ЦАП и АЦП, предназначенных для генерации и приема сигналов; усилителей зондирующего и принятого сигналов; коммутатора, позволяющего проводить УЗ контроль изделий в многоканальном режиме, а также контроллеров модулей АР. Также предусмотрена возможность использования различных простых и сложно-модулированных сигналов, в том числе сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ сигнала), у которого оператор может изменять среднюю частоту, девиацию частоты, длительность сигнала, подстраивая их значения под характеристики преобразователей АР и ОК.

Настройка параметров зондирующего сигнала, хранение эхосигналов, их обработка и отображение результатов контроля осуществляется с помощью специализированного ПО через программный пользовательский интерфейс. В ПО также предусмотрен выбор возможной конфигурации АР, соответствующей конфигурации поверхности контролируемых СК. На рис. 6 на фоне томограмм изделия с изображением плоского дна ОК показаны некоторые из заложенных в ПО наиболее типичные конфигурации адаптивной АР, соответствующих плоской (*a*), выпуклой (*б*), вогнутой (*в*) и круглой (овальной) (*г*) поверхности ОК.

Так как конфигурация поверхности в процессе контроля может изменяться, то в ПО предусмотрена возможность подстройки конфигурации адаптивной АР под каждую новую поверхность. При этом автоматически изменяются условия построения томограмм.

На рис. 7 показана схема для расчета томограммы изделия с произвольной поверхностью с помощью алгоритма «фокусировка в точку». На этой схеме показаны излучающий ПЭП с порядковым номером  $n$ , который имеет координаты  $(x_{ПЭП_n}, y_{ПЭП_n})$ , а также один приемный ПЭП антенной решетки с номером  $m$ , который имеет координаты  $(x_{ПЭП_m}, y_{ПЭП_m})$ . Дефект расположен в точке  $D_{i,j}$  с

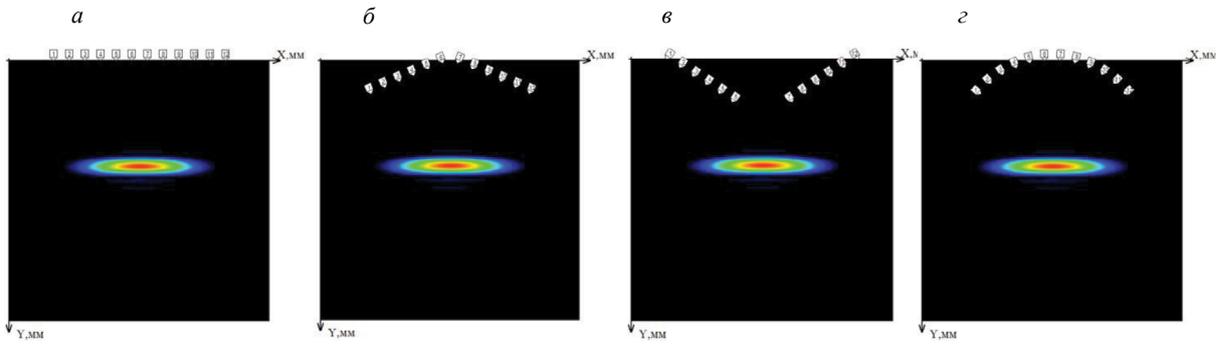


Рис. 6. Выбор возможной конфигурации AP под форму поверхности СК.

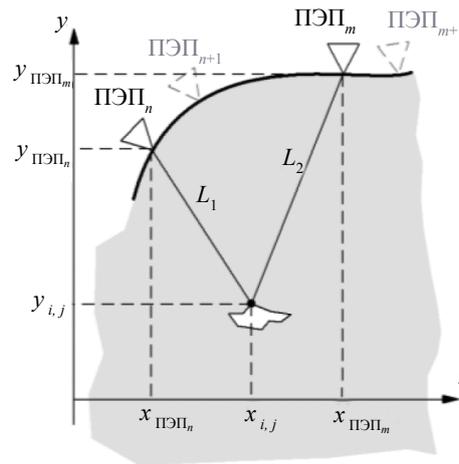


Рис. 7. Принцип синтеза алгоритма «фокусировка в точку» для СК с произвольной поверхностью.

координатами  $X_i$  и  $Y_j$ . Соответственно УЗ сигнал проходит путь от излучающего преобразователя до дефекта  $L_1$  и путь от дефекта до приемного преобразователя  $L_2$ :

$$L_1 = \sqrt{(x_{i \dot{y} n} - x_{i,j})^2 + (y_{i \dot{y} n} - y_{i,j})^2}, \tag{1}$$

$$L_2 = \sqrt{(x_{i \dot{y} m} - x_{i,j})^2 + (y_{i \dot{y} m} - y_{i,j})^2}. \tag{2}$$

Сумма путей  $L_\Sigma = L_1 + L_2$ , отнесенная к скорости распространения УЗ колебаний  $C$ , позволяет определять время прихода УЗ сигнала от предполагаемого отражателя в точке  $D_{i,j}$ :

$$t_{i,j} = \frac{L_1 + L_2}{C} + t_{\text{зад}}. \tag{3}$$

Имея ансамбль сигналов, определяем амплитуду УЗ сигнала для каждой пары приемного и передающего преобразователя для точки  $D_{i,j}$ . Если в этой точке присутствует отражатель, то суммарный сигнал от всех пар преобразователей после синфазного сложения будет иметь амплитуду:

$$U_{\Sigma_{i,j}} = \sum_n \sum_m U_{m,n} \left( \frac{\sqrt{(x_{i \dot{y} n} - x_{i,j})^2 + (y_{i \dot{y} n} - y_{i,j})^2} + \sqrt{(x_{i \dot{y} m} - x_{i,j})^2 + (y_{i \dot{y} m} - y_{i,j})^2}}{C} \right). \tag{4}$$

Если в точке  $D_{i,j}$  дефект отсутствует, то суммарный сигнал в отсутствии шума равен нулю.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТОМОГРАФИИ ИЗДЕЛИЙ С НЕСТАНДАРТНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

На рис. 8 приведены результаты томографии бетонного цилиндрического блока диаметром 300 мм с отверстием диаметром 50 мм, полученные с помощью УЗ томографа с адаптивной антенной решеткой. Чтобы определить реальные координаты отверстия необходимо определить скорость распространения УЗ волн в бетоне. Скорость поперечной волны, измеренная традиционным способом по скорости поверхностной поперечной волны с горизонтальной поляризацией, составила  $C_t = 2000$  м/с, однако на томограмме, построенной для этой скорости (рис. 8б), дефект выявляется недостаточно четко, а его координаты не соответствуют расположению отверстия в цилиндре. Для повышения точности определения координат дефекта был реализован безэталонный способ определения скорости, основанный на использовании алгоритма «фокусировка в точку». На рис. 8 приведены девять двумерных томограмм цилиндрического изделия, полученные при различных значениях расчетной скорости ультразвука. По этим двумерным томограммам достаточно сложно определить ту из них (рис. 8ж), при которой амплитуда эхосигнала от дефекта максимальна. Поэтому истинная скорость ультразвука в бетонном изделии  $C_t \approx 2400$  м/с была определена в автоматическом режиме по результатам построения трехмерных томограмм цилиндрического ОК в ИК. Также по трехмерной томограмме, построенной для скорости  $C_t \approx 2400$  м/с, были определены координаты отверстия в цилиндрическом бетонном изделии.

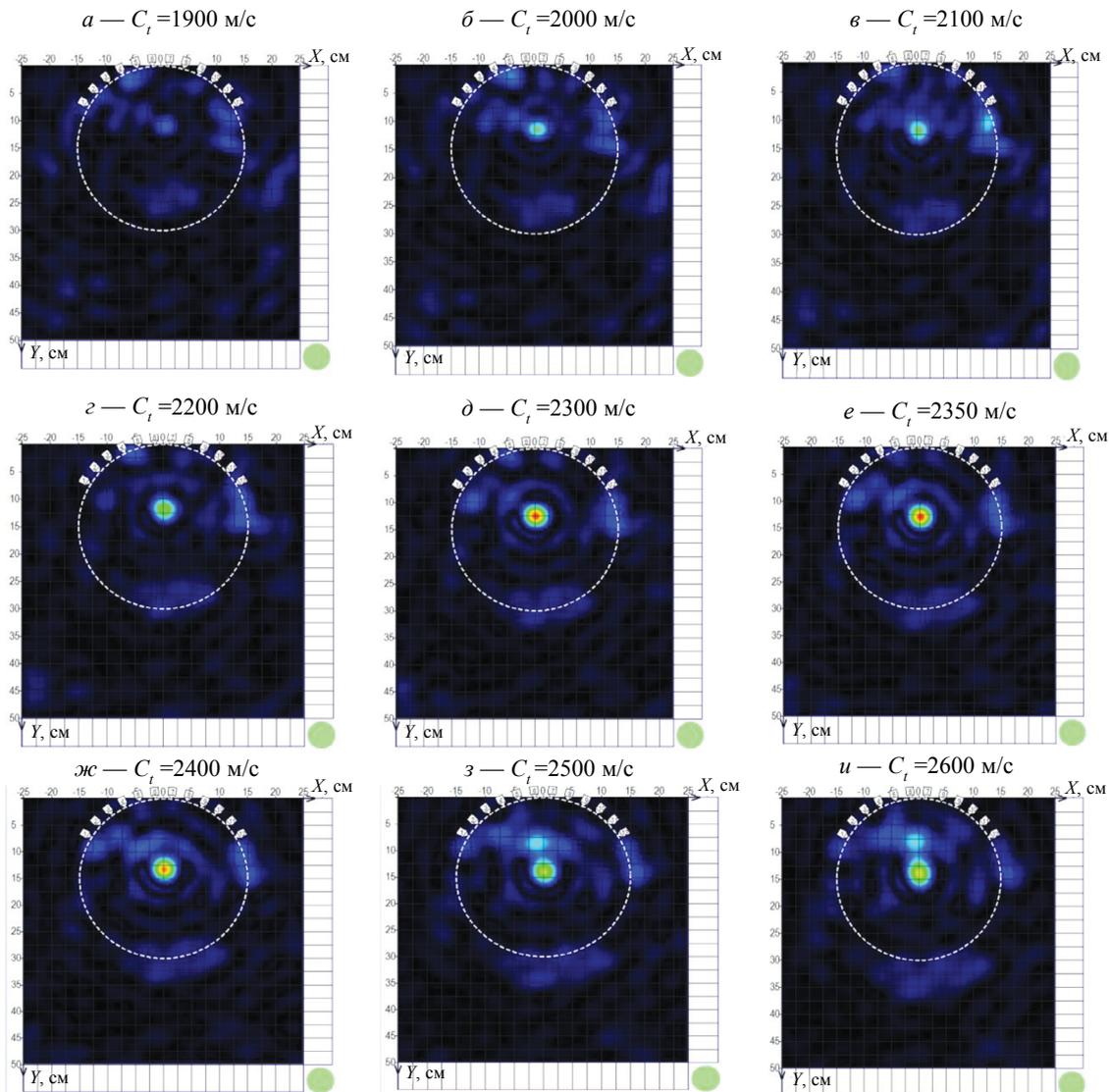


Рис. 8. Томограммы СК, полученные при различных значениях расчетной скорости УЗК.

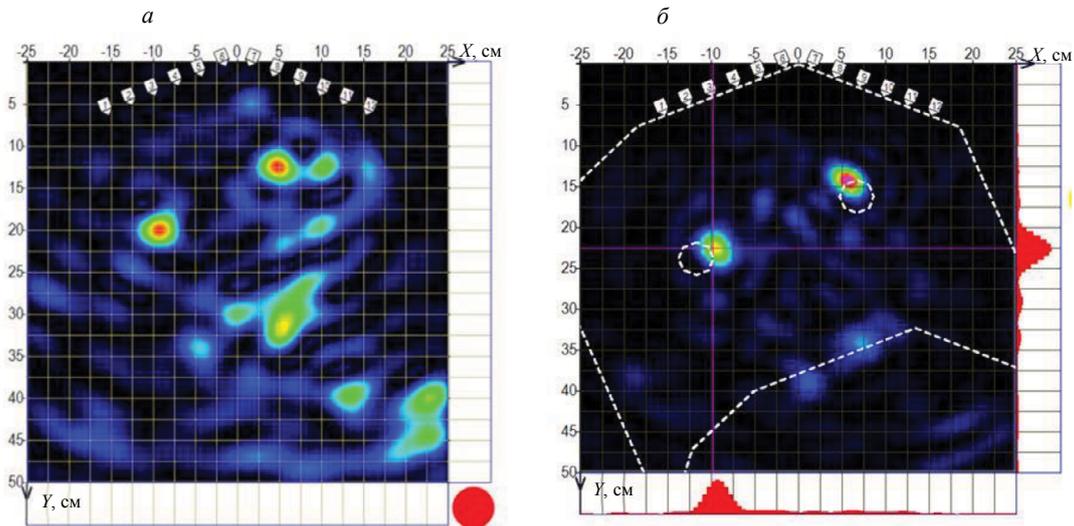


Рис. 9. Результат контроля бетонного ОК с выпуклой (выпуклой) поверхностью:  
*a* — томограмма, полученная с использованием измеренного значения скорости поверхностной волны; *б* — томограмма, построенная с использованием значения скорости  $C_1 \approx 2400$  м/с, измеренной с помощью алгоритма «фокусировка в точку».

Аналогичным образом были проконтролированы изделия с иными формами поверхности. Так, на рис. 9*a* показаны результаты контроля изображенного на рис. 5*a* бетонного блока «внешним углом», в котором имеются два цилиндрических отверстия диаметром 40 мм. Для этого программным путем задавалась одна из предусмотренных в ПО конфигураций антенны, соответствующая «выпуклой поверхности» (см. рис. 6*б*). Затем определялась скорость ультразвука в бетоне. Вначале производилось измерение скорости поперечных волн по скорости поверхностной волны, однако измеренная таким традиционным способом скорость ультразвука привела к ложным результатам (рис. 9*a*). Использование безэталонного способа измерения скорости УЗ колебаний с помощью алгоритма «фокусировка в точку» позволило получить изображение бетонного изделия с нестандартной поверхностью, которое адекватно отображает его структуру: местоположение границы раздела сред цилиндрических отверстий соответствует их положению в бетонном изделии (рис. 9*б*).

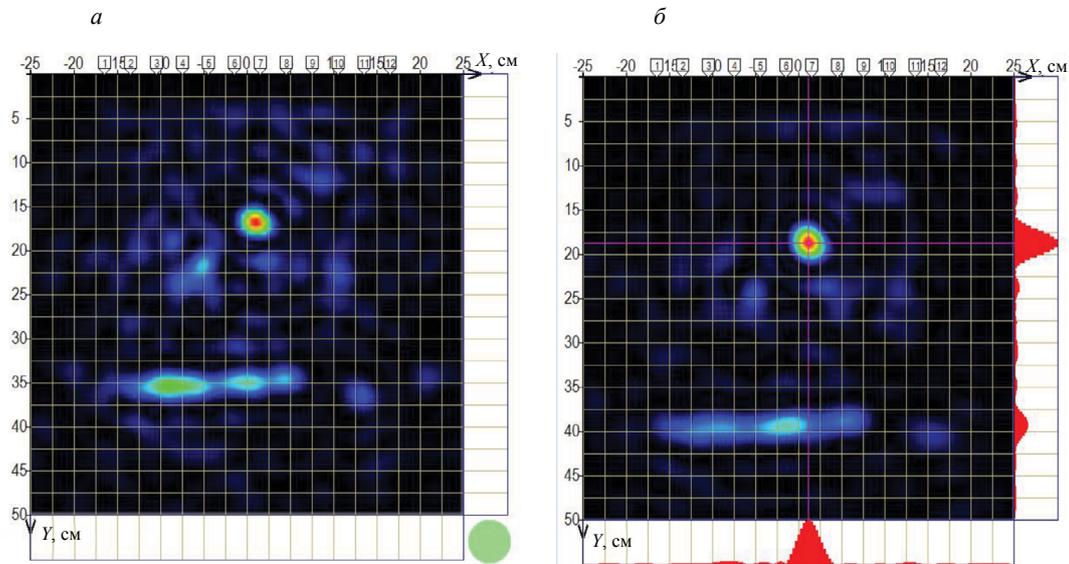


Рис. 10. Томограммы СК с плоской поверхностью толщиной 400 мм с отверстием, расположенным на глубине  $h = 200$  мм, построенные при значении скорости поверхностной поперечной волны  $C_{n1} = 1550$  м/с, измеренной традиционным методом (*a*), и скорости поверхностной волны  $C_2 = 1750$  м/с, измеренной с помощью алгоритма «фокусировка в точку» (*б*).

На рис. 10а показаны результаты томографии ОК с плоской поверхностью (стены, изображенной на рис. 5в) толщиной  $H = 400$  мм с дефектом (цилиндрическим отверстием диаметром 50 мм), расположенным на глубине  $h = 200$  мм. Сначала для построения томограммы использовалось значение измеренной традиционным способом скорости поверхностной поперечной волны  $C_{t1} = 1550$  м/с. На томограмме, показанной на рис. 10а, видны дефект ( $h_1 \approx 160$  мм) и донная поверхность ( $H_1 = 362$  мм), координаты которых отличаются от известных заранее значений (погрешность измерения составила 9,5 %). На следующем этапе скорость УЗ колебаний в бетоне была определена с помощью алгоритма «фокусировка в точку»:  $C_{t2} = 1750$  м/с. На томограмме (рис. 10б), построенной при этой скорости ультразвука, дефект расположен на расстоянии  $h_2 \approx 190$  мм, донная поверхность располагается на расстоянии  $H_2 = 395$  мм (погрешность составила  $\approx 1,3$  %). Таким образом, результаты экспериментов по определению скорости ультразвука подтверждают высокую точность и надежность безэталонного способа измерения скорости ультразвука в бетоне, основанного на использовании алгоритма обработки сигналов УЗ антенной решетки «фокусировка в точку».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большинство приборов УЗ контроля используют проверенные и одновременно простые методы контроля, в которых практически не применяется сложная радиотехническая обработка сигналов. Вместе с тем, современная электронная база позволяет создавать достаточно дешевые, надежные устройства, с помощью которых возможно реализовывать многочисленные алгоритмы обработки сигналов, позволяющие повысить качество контроля изделий. Пример тому — УЗ адаптивный томограф, в котором наряду с использованием адаптивной антенны осуществляется безэталонный способ измерения скорости распространения ультразвука и одновременно координат дефектов и габаритов изделия, а также производится адаптация параметров зондирующих сигналов с целью контроля разнообразных изделий с нестандартной конфигурацией поверхности.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук № МК-1523.2020.8.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль / Справочник. В 7 т. Под общей редакцией В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
2. Jansohn R., Schickert M. Objective Interpretation of Ultrasonic Concrete Image // NDT.net. December 1998. V. 3. No. 12.
3. Samokrutov A.A., Kozlov V.N., Shevaldykin V.G. Ultrasonic testing of concrete objects using dry acoustic contact. Methods, instruments and possibilities / The 5th International Conference on Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in Industry, Moscow, Russia. 2006. V. 152.
4. Schickert M., Krause M. Ultrasonic Techniques for Evaluation of Reinforced Concrete Structures / In: C. Maierhofer, H.-W. Reinhardt, G. Dobmann (Eds.). Non-destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures. V. 2. Non-destructive Testing Methods. Cambridge: Woodhead, 2010. P. 490—530.
5. Paris O., Brédif Ph., Roy O. Study of phased array techniques for cracks characterization in concrete structures / International Symposium Non Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 411—448 September 2003.
6. Mielentz F. Phased Arrays for Ultrasonic Investigations in Concrete Components // J. Nondestruct. Eval. 2008. V. 27. P. 23—33. DOI: org/10.1007/s10921-008-0032-6
7. Качанов В.К., Соколов И.В., Концов Р.В. et al. Using «Focusing to a Point» Algorithm for Reference-Free Measurement of the Speed of Ultrasound in Tomography of Concrete Engineering Structures // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 6. P. 443—452. [Качанов В.К., Соколов И.В., Концов Р.В., Тимофеев Д.В. Использование алгоритма «фокусировка в точку» для безэталонного измерения скорости ультразвука при томографии строительных конструкций из бетона // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 20—29.]
8. Введение в технологию применения ультразвуковых фазированных антенных решеток / Перевод: к.т.н. С.В. Реука. СПб.: СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2011. 210 с.
9. Кондратенков Г.С., Потехин В.А., Реутов А.П., Феоктистов Ю.А. Радиолокационные станции обзора Земли. М.: Радио и связь, 1983.
10. <http://www.acsys.ru/production/>

11. *Kachanov V.K., Kartashev V.G., Sokolov I.V.* Ultrasonic Tomograph of Concrete Building Structures with Lateral Signal Radiation // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 2. P. 110—118. [*Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Концов Р.В., Трунов Э.И.* Ультразвуковой томограф бетонных строительных конструкций с боковым излучением сигнала // Дефектоскопия. 2020. № 2. С. 12—20.]
12. *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.
13. *Шевалдыкин В.Г.* О безэталонном измерении толщины изделий с переменной по глубине скорости звука // Дефектоскопия. 1986. № 3. С. 20—22.
14. *Качанов В.К., Соколов И.В., Концов Р.В., Синицын А.А.* Использование антенных решеток для безэталонного измерения скорости ультразвука и толщины бетонных изделий // Дефектоскопия. 2017. № 1. С. 26—33.
15. *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.
16. *Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Концов Р.В., Федоров М.Б.* Ультразвуковая адаптивная многофункциональная дефектоскопия. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 175с.