

# МУЛЬТИВОЛНОВОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ БЕТОНА

СНЕЖКОВ Д.Ю., ЛЕОНОВИЧ С.Н.

*Белорусский национальный технический университет*

**Введение.** Прочность является показателем предельного состояния бетона как конструкционного материала, но она не может служить исчерпывающей характеристикой его деформационных свойств, которые для расчетов железобетонных конструкций, расчетов их совместной работы играют не меньшую роль, чем прочность бетона. В настоящее время ни в отечественных нормативах, ни в нормативах стран СНГ, ни в стандартах Евросоюза вопросы определения упруго-деформативных свойств бетона конструкций неразрушающими методами не рассматриваются. Основной причиной этого является отсутствие апробированных методик определения упруго-деформативных показателей бетона конструкций и соответственно – адаптированных к такого рода методикам приборных средств испытаний.

**Методика исследования.** Возможной основой для решения указанной задачи может служить методика мультиволнового акустического контроля бетона. Заметим, что вопросы совместного использования для оценки физико-механических свойств бетона акустических волн различных типов не нашли в настоящее время адекватного отражения в действующих нормативах. Ни старой редакцией ГОСТ 17624-87, ни новой – ГОСТ 17624-2012 [1], ни СТБ EN 12504-4-2014 [2] не регламентируется тип используемой волны зондирующего бетон импульса. Фактически же во всех без исключения существующих приборах ультразвукового контроля прочности бетона в качестве информационного параметра используется скорость/время распространения импульса только продольной волны.

## *Мультиволновой контроль бетона в конструкциях*

Существенное преимущество мультиволнового ультразвукового контроля заключается в том, что совместная интерпретация параметров прохождения волн различных типов позволяет получать информацию об упругих параметрах бетона. Для однородной изо-

тропной среды известны [3, 4] соотношения, позволяющие по соотношению скоростей распространения продольной и поперечной волн рассчитать упругие модули:

$$v_{\partial} = \frac{0,5 - \left( \frac{V_T}{V_L} \right)^2}{1 - \left( \frac{V_T}{V_L} \right)^2} ; \quad (1)$$

$$E_{\partial} = \frac{V_L^2 \cdot \rho \cdot (1 + v)(1 - 2v)^2}{1 - v} ; \quad (2)$$

$$V_R = \frac{0.85 + 1.12v_D}{1 + v_D} , \quad (3)$$

где  $E_{\partial}$  – динамический модуль Юнга;  $v_{\partial}$  – динамический коэффициент Пуассона;  $V_T$  – скорость распространения поперечной упругой волны;  $V_L$  – скорость распространения продольной упругой волны;  $V_R$  – скорость распространения поверхностной упругой волны.

Находящиеся в обращении типовые приборы ультразвукового контроля не позволяют выполнить оценку скорости распространения поперечной волны. Одна из основных причин затруднений обусловлена тем, что используемые одинарные электроакустические преобразователи не позволяют отдельно излучать и принимать только какой-либо один тип волны, что, в свою очередь, связано со значительной реверберацией ультразвуковых колебаний в самом преобразователе – излучающем и приемном. При этом за время реверберации может происходить многократная смена поляризации вектора колебаний протектора излучателя, а в приемном преобразователе – взаимная трансформация и смешивание всех принятых колебаний. Характер реверберации во многом случаен – реверберационные процессы экземпляров преобразователей даже одного типа могут значительно отличаться. Пространственной селективностью одинарные Рецензор с точечным акустическим контактом практически не обладают, что исключает использование разницы в пространственной локализации волновых импульсов [5, 6]. В то же время энергетические показатели импульса волны Релея позволяют осуществить его селективный прием с использованием типовых приборных средств испытаний.

Контроль протяженных бетонных и железобетонных конструкций удобно производить при одностороннем доступе к поверхности, когда инициирующий и приемный преобразователи устанавливаются на одной стороне (границы) конструкции [7, 8]. Поэтому метод так называемого поверхностного прозвучивания, регламентируемый ГОСТ 17624, получил в практике ультразвукового контроля прочности бетона наибольшее распространение, и вполне резонно его же использовать и для мультиволнового контроля.

На рисунке показаны временные диаграммы акустических импульсов в плоскости, перпендикулярной поверхности испытуемого образца в направлении распространения волны, на расстоянии 150 мм от точки возбуждения, полученные моделированием распространения упругих волн методом конечных элементов

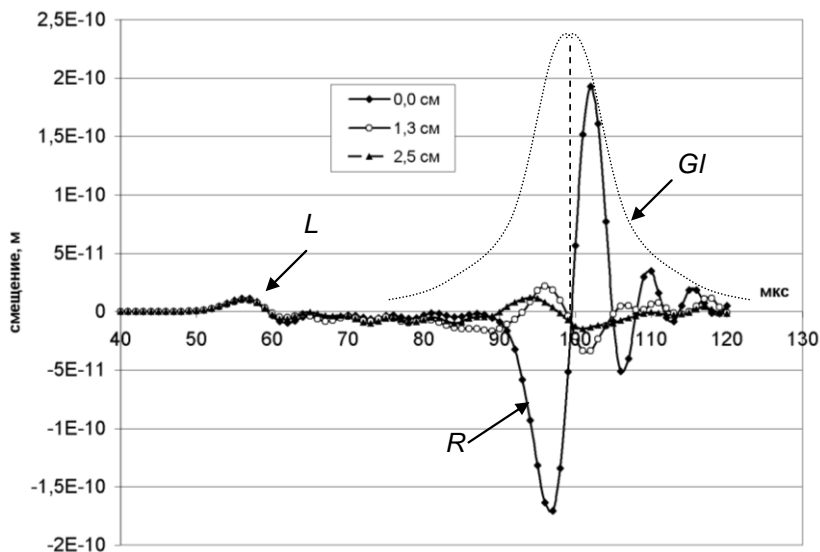


Рис. 1. Временные диаграммы импульсов смещения узлов КЭ модели в направлении, нормальном к поверхности в точках на расстоянии 150 мм от точки возбуждения нормальным к поверхности импульсом: *L* – импульс, инициированный продольной подповерхностной волной; *R* – импульс волны Релея; *GI* – колоколообразная огибающая импульса волны Релея; длительность инициирующего полусинусоидального импульса давления – 7 мкс

Обозначению *L* соответствует импульс продольной волны, первое вступление импульса волны Релея обозначено *R*. Первое вступ-

ление этого типа колебаний, обусловленное волной Релея, имеет фазу, противоположную фазе импульса продольной волны, и достигает в амплитуде  $1,7 \cdot 10^{-10}$  м, что более чем на порядок превышает уровень первого вступления продольной волны –  $1 \cdot 10^{-11}$  м. Ярко выражена поверхностная локализация волны Релея: на глубине 1,3 см наблюдается снижение ее интенсивности и изменение фазы колебаний. Принимая во внимание, что импульс продольной волны существующих ультразвуковых приборов надежно регистрируется на расстоянии 15...25 см от точки возбуждения и что затухание мощности волны Релея прямо пропорционально расстоянию от точки возбуждения, можно рассчитывать, что ее импульс будет надежно регистрироваться обычными приборами ультразвукового контроля на расстоянии порядка 1,5...2 м от точки возбуждения.

На рисунке приведен начальный участок временной диаграммы принятого ультразвукового импульса, прошедшего через бетон, для случая его поверхностного прозвучивания в натуральных условиях испытаний. Кривая *a* соответствует сигналу, полученному при максимальном усилении, кривая *b* – при 30-кратном его ослаблении аттенуатором на входе приемного тракта прибора. Импульсу продольной волны на рисунке соответствует около трех-четырех периодов колебаний в интервале времени 85...130 мкс.

Спецификой ультразвукового контроля бетона является использование волн, частота которых лежит в диапазоне 35..100 кГц. Соответственно при типичной скорости распространения импульса ультразвуковой продольной волны около  $4000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  длина волны колебаний находится в пределах от 4 до 11 см. При длине волны около 8 см пространственная длительность импульса в бетоне составляет 30...35 см, заполняя собой больше половины базы измерения к моменту приема первого его вступления.

Значительная колебательность диаграммы на рисунке, в отличие от поведения идеализированной модели на рисунке 1, обусловлена реверберационными процессами в использованных ЭАП. Поскольку скорости распространения поперечной SH волны и волны Релея примерно в два раза меньше скорости продольной волны, то начальные участки импульсов этих волн будут накладываться на «концовку» импульса продольной волны, что и видно на рисунке в области временных отметок 120...130 мкс.

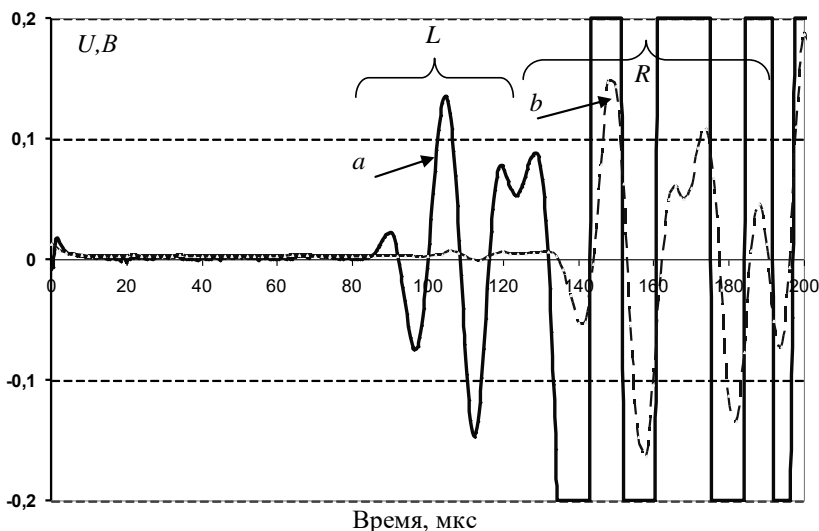


Рис. 2. Временная диаграмма принятого ультразвукового импульса:  
*L* – импульс продольной волны; *R* – начальная часть импульса волны Релея;  
 база измерения – 50 см; частота – 55 кГц. (направление вектора колебаний  
 протектора, нормальное к поверхности бетона)

При меньших базах происходит более «плотное» наложение импульсов, что затрудняет их временную селекцию. Надежно разделить волновые составляющие возможно, либо используя большие базы прозвучивания и производя селекцию волновых составляющих по времени, либо учитывая дополнительные отличительные признаки, в частности, разницу в уровне сигналов.

***Экспериментальное исследование процесса распространения волн зондирующего ультразвукового импульса продольной волны и волны Релея в крупноразмерном бетонном образце на больших базах прозвучивания***

При иницировании колебаний нормальной к поверхности силовым воздействием интенсивность продольной волны в направлении вдоль контролируемой поверхности минимальна и сильно зависит от характера акустического контакта и коэффициента Пуассона материала [6]. Несмотря на это, данный тип волн является единственным используемым в настоящее время для контроля физико-механических параметров бетона, поскольку регистрация време-

ни/скорости распространения данного типа импульса имеет самую простую техническую реализацию.

Для увеличения амплитуды колебаний продольной подповерхностной волны вектор возбуждения ориентируют в направлении распространения волны – вдоль поверхности. Поскольку продольная волна по мере распространения вовлекает в колебательный процесс все больший объем материала, передавая ему энергию инициирующего импульса, то ее интенсивность по мере удаления от точки возбуждения снижается – так называемое геометрическое рассеивание. Для материала без потерь мощность колебаний в точке измерения будет обратно пропорциональна квадрату расстояния от точки возбуждения.

При нормальном к поверхности векторе возбуждения максимум интенсивности поперечной волны наблюдается в направлении около  $50^\circ$  от нормали. Из всех типов объемных волн на долю поперечной волны приходится наибольшая энергия. По этому показателю поперечные волны представляют интерес в качестве зондирующего сигнала. Именно этот тип волны используется в ультразвуковых дефектоскопах-томографах бетона [9, 10], применяемых для обнаружения дефектов сплошности бетонного массива. Геометрическое рассеивание энергии поперечной волны также прямо пропорционально квадрату расстояния от источника.

Волна Релея распространяется только вдоль поверхности массива, захватывая приповерхностный слой материала. Ее уровень сильно зависит от состояния поверхности (неровностей, неоднородных включений). Так как волна Релея вовлекает в колебательный процесс слой материала постоянной толщины, то ее затухание будет заметно меньше, чем у других типов волн, геометрическое рассеивание энергии волны Релея прямо пропорционально расстоянию от источника возбуждения.

Для проверки возможности регистрации импульса поверхностной волны и оценки метрологических показателей методики измерений была выполнена серия ультразвуковых измерений на натурном крупноразмерном образце.

На рисунке 3 приведен общий вид испытательного образца и использованное оборудование, на рисунке и в таблице 1 – характеристические размеры образца.

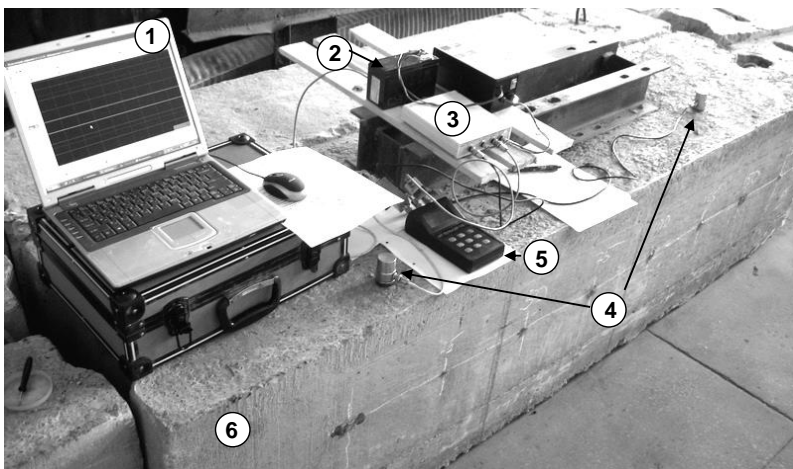


Рис. 3. Используемое измерительное оборудование:

- 1 – Notebook с программой регистрации акустических сигналов;  
 2 – аккумулятор источника питания АПП; 3 – аналого-цифровой преобразователь (цифровой осциллограф) В-421; 4 – излучающий и приемный ЭАП;  
 5 – измеритель времени распространения ультразвукового импульса «Пульсар-1.2» с разветвителем сигналов; 6 – испытательный бетонный образец с разметкой точек установки ЭАП

Таблица 1 – Характеристические размеры образца

Характеристический размер, м	
A	2,36-2,38
B	0,58-0,60
C	0,59-0,60
X	0,39
Y	0,23

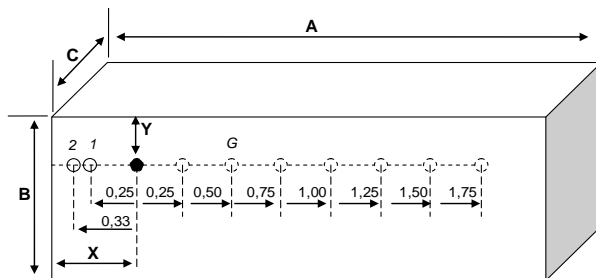


Рис. 4. Схема установки ультразвуковых преобразователей на испытательном бетонном образце

Для оценки влияния на метрологические показатели типа акустического контакта измерения проводились тремя сериями, в каждой из которых менялся тип контакта ЭАП с поверхностью бетона. В серии ВВ оба преобразователя устанавливались без концентраторов через контактную смазку. В серии ВТ приемный ЭАП устанавливался через контактную смазку, излучающий – с сухим точечным контактом (СТК), с концентратором. В серии ТТ оба ЭАП использовались с СТК. Измерения в каждой серии производились при неизменной позиции приемного преобразователя в точке с координатами  $X, Y$ . Координата  $X$  излучателя менялась ступенчато с шагом 25 см. Минимальная база измерения составляла 25 см, максимальная - 175 см. В испытаниях использовались оригинальные ЭАП разработки НИЛ ПГС с основной модой резонансной частоты 75 КГц. Характер основного возбуждающего силового воздействия – нормальный к поверхности. На рисунках приведены временные диаграммы акустических сигналов на базах измерения 25 см и 175 см для серии ВВ.

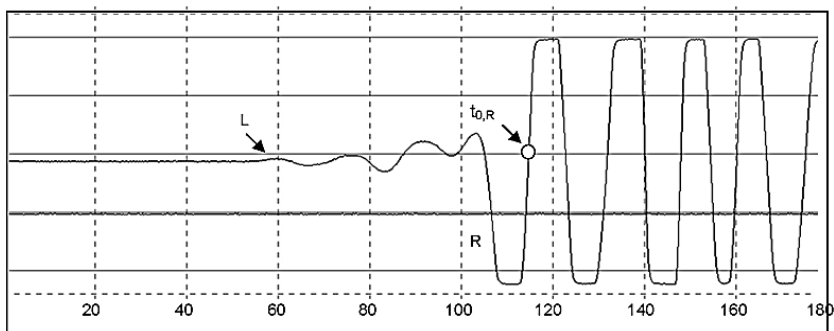


Рис. 5. Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 25 см с использованием вязкого акустического контакта ЭАП:  $L$  – первое вступление подповерхностной продольной волны;  $R$  – первое вступление импульса волны Релея; горизонтальная координата соответствует оси времени, отметки – в микросекундах, вертикальная координата соответствует уровню сигнала предусилителя прибора «Пульсар-1.2», масштаб – 0,5 В/деление

Сопоставляя диаграммы на рисунках, можно констатировать качественное сходство сигналов. Основное их отличие заключается в значительной временной апертуре реальных акустических сигналов, обусловленной главным образом выраженным резонансным харак-



тером передаточной характеристики приемного и излучающего ЭАП. Причем, судя по периодической смене фазы колебаний, хорошо заметной на диаграмме, передаточная частотная характеристика «излучающий ЭАП–бетон–приемный ЭАП» имеет несколько (не менее двух) резонансов.

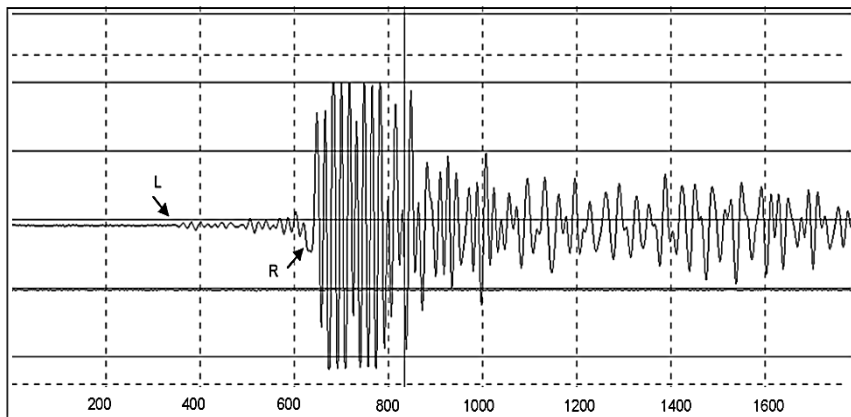


Рис. 6. Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 175 см с использованием вязкого акустического контакта ЭАП: L – первое вступление подповерхностной продольной волны; R – первое вступление импульса волны Релея; горизонтальная координата соответствует оси времени, отметки – в микросекундах, вертикальная координата соответствует уровню сигнала предусилителя прибора «Пульсар-1.2», масштаб – 0,5 В/деление

Как и ожидалось, характерным для всех диаграмм является значительная амплитуда сигнала волны Релея. На диаграмме (см. рис. 6) первое вступление импульса продольной подповерхностной волны практически полностью маскируется шумами приемного усилителя и визуально не регистрируется, импульс поверхностной волны фиксируется надежно. Это позволяет предположить, что для типовых составов конструкционного бетона измерительная база поверхностного прозвучивания может быть увеличена до 2...2,5 м без потери точности оценки времени распространения импульса и без необходимости применения алгоритмов накопления сигнала и его корреляционной обработки [11].

В таблице приведены данные для серии ВВ. Характеристическим параметром является дифференциальная скорость распространения акустических импульсов.

Таблица 2 – Данные регистрации параметров акустических волн серии ВВ

База, см	$t_{0,L}$ , мкс	$\Delta t_{0,L}$ , мкс	$v_{d,L}$ , м/с	$\Delta v/v_L$	$t_{0,R}$ , мкс	$\Delta t_{0,R}$ , мкс	$v_{d,R}$ , м/с	$\Delta v/v_R$
25	56	56	4464	0,000	114,5	105	2381	0,002
50	110	54	4630	-0,037	220	105,5	2370	0,007
75	169	59	4237	0,051	326	106	2358	0,011
100	221	52	4808	-0,077	431	105	2381	0,002
125	284	63	3968	0,111	538	107	2336	0,021
150	338	54	4630	-0,037	641	103	2427	-0,017
175	392	54	4630	-0,037	743	102	2451	-0,027
К.вариации		0,072	<b>0,069</b>			0,013	<b>0,013</b>	
ср. знач.		56,0	4464,3			104,8	2385,8	
				<b>r =</b>	<b>0,705</b>			

*Примечание:*  $t_{0,L}$ ,  $t_{0,R}$  – моменты времени появления первого вступления импульса продольной подповерхностной волны и волны Релея;  $\Delta t_{0,L}$ ,  $\Delta t_{0,R}$  – разница текущего и предшествовавшего значений времени распространения;  $v_{d,L}$ ,  $v_{d,R}$  – дифференциальные скорости импульсов продольной и поверхностной волн:  $v_{d} = \Delta L / \Delta t_0$ , где  $\Delta L$  – шаг профилирования, для всех серий  $\Delta L = 0,25$  м.

Относительные отклонения дифференциальной скорости распространения ультразвуковых импульсов продольной подповерхностной волны и волны Релея от средних значений представлены на диаграмме.

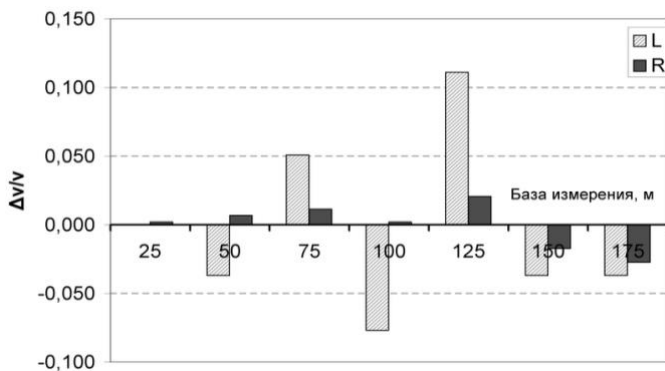


Рис. 7. Зависимость вариации дифференциальной скорости УЗ импульса продольной волны и волны Релея от базы измерения для серии ВВ: L – для импульса продольной волны; R – для импульса волны Релея

Следует отметить, что по данному показателю оценки скорости импульса волны Релея заметно превосходят оценки скорости продольной волны: коэффициент вариации скорости импульса волны Релея для серии ВВ равен 0,013; для продольной волны – 0,069. Сильная взаимная корреляция скорости импульсов ( $r = 0,705$ ) указанных типов волн в серии ВВ может указывать на то, что превалирующим фактором, влияющим на вариацию скорости импульсов, является вариация свойств бетона вдоль линии профилирования.

Для серии ТВ коэффициент корреляции уменьшается до 0,45. Для этой серии преимущество волны Релея по показателю вариации дифференциального значения скорости сохраняется, хотя их соотношение снижается до двукратного.

Для серии ТТ корреляция практически отсутствует ( $r = 0,037$ ). Характерны «провалы» в регистрации первого вступления импульса продольной волны для базы, начиная с 0,75 м, – его амплитудное значение практически неразличимо на фоне шумов. В то же время несмотря на то, что импульс волны Релея регистрировался без затруднений, вариация его скорости возросла почти в три раза и достигла значения 0,036.

Отсутствие взаимной корреляции скорости импульсов указанных типов волн может быть обусловлено превалирующим влиянием нестабильности сухого точечного акустического контакта ЭАП и снижением соотношения сигнал/шум за счет потерь в акустическом контакте. В пользу данного предположения может свидетельствовать монотонный рост коэффициента вариации отклонений скорости по мере поэтапной замены ЭАП с вязким контактом на ЭАП с СТК. В таблице 3 приведены коэффициенты корреляции одноименных скоростей импульсов между сериями.

Таблица 3 – Коэффициенты корреляции скоростей импульсов

	ВТ		ТТ	
	Прод. волна	Поверхн. волна	Прод. волна	Поверхн. волна
ВВ	0,234	<b>0,780</b>	0,048	<b>0,667</b>
ВТ			0,603*	<b>0,671</b>

\* Значение получено после отбрасывания неустойчивых данных времени распространения импульса продольной волны в серии ТТ.

Высокие значения коэффициентов корреляции для поверхностной волны указывают на присутствие во всех сериях одного и того же фактора, предположительно – неоднородности бетона по линии профилирования, влияющего на скорость распространения импульса. Для импульса продольной волны значительная случайная погрешность в определении времени распространения, обусловленная низким соотношением сигнал/шум приемного тракта ультразвукового прибора в сериях ВТ и ТТ, замаскировала влияние неоднородности бетона, что выразилось в отсутствии корреляции скорости продольной волны для серий.

**Выводы.** Практическое применение поверхностной волны для целей диагностики состояния бетонного массива методом поверхностного прозвучивания и продольного профилирования на базах 1,5...2 м возможно с использованием типовых ультразвуковых электроакустических преобразователей с сухим точечным контактом. Метрологические показатели методики определения скорости распространения ультразвукового импульса поверхностной волны позволяют снизить неопределенность оценки и, как следствие, – легко обнаруживать отклонения физико-механических свойств бетона по линии профилирования.

В основу методики селекции акустических волн на базах поверхностного прозвучивания бетона более 0,4...0,5 м может быть положено амплитудное разделение составляющих акустического сигнала.

## Библиография

1. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624-2012. Введ. 01.01.2014. М., 2014. 16 с.
2. СТБ EN 13791-2012 Оценка прочности на сжатие конструкций и элементов сборного бетона в реальных условиях. Минск: Госстандарт, 2012. 18 с.
3. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Клюев [и др.]. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
4. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / редкол.: И.П. Голямина [и др.]. М.: Советская энциклопедия, 1979. 396 с.

5. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29-41.
6. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Неразрушающий контроль бетона в монолитном строительстве: совершенствование средств и методов. Минск: БНТУ, 2006. 218 с.
7. Леонович С.Н., Снежков Д.Ю., Мулярчик В.С. Результаты мониторинга прочностных характеристик монолитных бетонных плит на основе неразрушающих методов контроля // Вестник Брестского государственного технического университета. Ч. 2: Строительство и архитектура. 2004. С. 115-121.
8. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Исследование неравнопрочности бетона на объекте монолитного строительства комплексным неразрушающим методом // Известия вузов. Строительство / Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет. 2009. № 8. С. 108-115.
9. Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Контроль бетона ультразвуковым эхо-импульсным томографом с сухим контактом // Контроль. Диагностика. 1998. № 1. С. 49-51.
10. Ultrasonic defectoscopy of concrete by means of pulse-echo technique / A.A. Samokrutov, V.N. Kozlov, V.G. Shevaldykin, I.A. Meleshko // 8<sup>th</sup> European conference for Non-Destructive Tensing. Barcelona, 17-21 June, 2002. 6 p.
11. Качанов В.К., Соколов И.В. Проблемы ультразвукового контроля протяженных сложноструктурных изделий с большим затуханием сигналов // Дефектоскопия. 2007. № 8. С. 82-93.