

УДК 691.328.4

**Дмитрий Юрьевич СНЕЖКОВ,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
"Технология  
строительного производства"  
Белорусского национального  
технического университета

**Сергей Николаевич ЛЕОНОВИЧ,**  
доктор технических наук,  
профессор,  
заведующий кафедрой  
"Технология  
строительного производства"  
Белорусского национального  
технического университета

**Юрий Иванович ЛАГУН,**  
старший преподаватель кафедры  
"Металлические  
и деревянные конструкции"  
Белорусского национального  
технического университета

## О ВЛИЯНИИ АРМИРОВАНИЯ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

### ON ULTRASONIC CONTROL OF CONCRETE STRENGTH AND EFFECTS OF REINFORCEMENT

В статье рассматривается вопрос влияния армирования на оценку скорости распространения ультразвукового импульса в бетонном массиве. Представлена методика и результаты моделирования волнового процесса в армированном образце методом конечных элементов. Рассматривается возможность использования метода профилирования для повышения точности измерений скорости ультразвукового импульса в армированном бетоне для большой базы измерений.

The article considers the effects of reinforcement on the evaluation of the ultrasonic pulse velocity in mass concrete. The technique of the wave process simulation in the reinforced sample by using the method of finite elements has been given and the simulation results have been presented. The possibility of using a profiling method has been considered for raising accuracy of measurements of the ultrasonic pulse velocity in reinforced concrete.

#### ВВЕДЕНИЕ

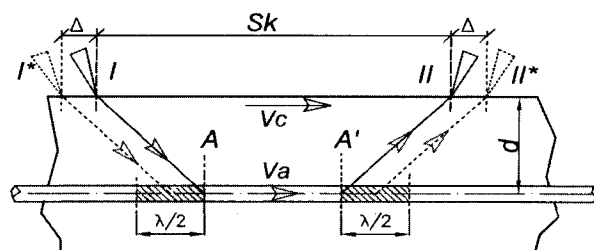
Одним из технологических факторов, влияющих на точность оценок прочности бетона ультразвуковым (УЗ) импульсным методом по ГОСТ 17624 [1], приводящим, как правило, к завышению прочности, является армирование в зоне контроля, поскольку скорость распространения акустических колебаний в стальной арматуре лежит в пределах от 5700 до 6200 м/с, превосходя на 50 %–80 % скорость ультразвука в зрелом бетоне. Высокая чувствительность ультразвукового импульсного метода к изменению скорости распространения зондирующего импульса, составляющая 2,5 %–3,5 % прироста оценки прочности при возрастании скорости УЗ импульса на 1,0 %, ставит фактор влияния армирования при определении прочности бетона в один ряд с факторами вариации состава бетона, его влагосодержания и срока твердения.

Сомнения в точности определении скорости УЗ импульса при испытаниях армированного бетона приборами с фиксированной базой измерения ("Пульсар-1.1/1.2", УК1401, "Бетон-22/32") достаточно эффективно устраняются предварительной проверкой самого факта влияния арматуры. Для этого производится несколько контрольных измерений в областях наибольшего и наименьшего влияния армирования, которые легко локализовать, используя измерители защитного слоя бетона: "ПОИСК-2.51/2.52", ИПА-МГ4, "Armoscan", "Profoscor" и им подобные. Причем в области потенциально максимального влияния арматуры измерения рекомендуются провести дважды — ориентируя направление про-

звучивания параллельно арматурному стержню и перпендикулярно (или под углом 45°) к нему. Устойчивая разница (или ее отсутствие) полученных значений скорости ультразвука подсказывает очевидный выбор дальнейших действий при осуществлении контроля конструкции. Разумеется, изложенная методика не решает вопроса о степени влияния арматуры, а лишь позволяет выявить случаи его проявления.

Для поверхностного прозвучивания конструкций (рис. 1) фактор влияния армирования проявляется в наибольшей степени, если направление прохождения зондирующего сигнала совпадает с направлением осей ближайших стержней арматуры.

Если прием УЗ импульса осуществляется по фронту первого вступления акустического сигнала, то минимальная (критическая) глубина залегания арматуры  $d_{кр}$ , ниже которой армирование начинает влиять на оценку скорости импульса, рассчитывается по известной формуле, приведенной в [2, 3]



I, II и I\*, II\* — точки ввода и приема УЗ импульса

Рис. 1. Схема траекторий распространения УЗ импульса в зоне армирования бетона

$$d_{кр} = \frac{S_k}{2} \cdot \sqrt{\frac{1-w}{1+w}}, \quad (1)$$

где  $w = v_c/v_a$  ( $v_c$  — скорость УЗ импульса в бетоне,  $v_a$  — скорость УЗ импульса в арматуре);  $S_k$  — база измерения (прозвучивания).

На рис. 2 приведены графики этой зависимости для базы прозвучивания  $S_k$ , равной 100, 150 и 200 мм.

Для принятого типового соотношения скоростей  $v_c$  и  $v_a$  критическая толщина защитного слоя составляет около 3,5 см (для  $S_k = 150$  мм).

При "диагональной" ориентации направления прозвучивания по отношению к арматурной сетке (см. рис. 2, кривые 1\*, 2\*, 3\*) критическая глубина залегания арматуры уменьшается, так как подобное расположение точек контакта эквивалентно уменьшению скорости УЗ импульса в арматуре в  $\sqrt{2}$  раз, если допустить, что диаметр арматуры имеет на порядок меньшее значение, чем база прозвучивания. Критическая толщина защитного слоя составит в этом случае около 1,6 см, что для подавляющего большинства монолитных изделий ниже нормированной толщины защитного слоя. Увеличение базы прозвучивания до 200 мм приводит к прямо пропорциональному росту критической толщины защитного слоя бетона (до 2,2 см), которое уже достигает нормированного значения.

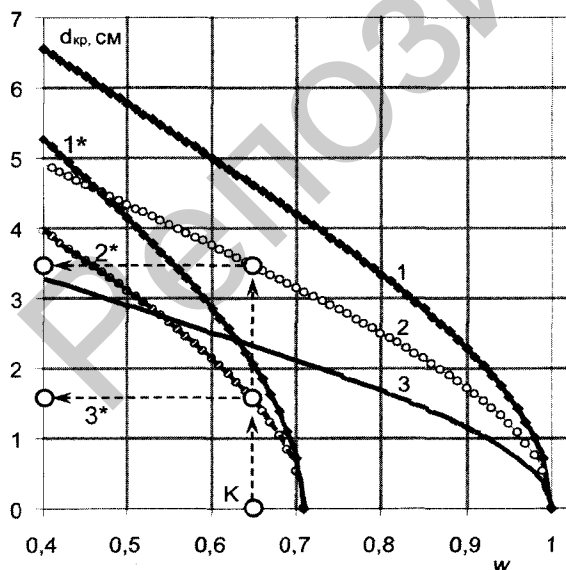
Следует заметить, что, несмотря на, казалось бы, очевидную правомерность схемы (см. рис. 1) механизма влияния армирования бетона на оценку скорости распространения УЗ импульса, ГОСТ 17624, а также ряд разработанных изготовителями приборов руководств обходят этот вопрос рекомендациями выбора зон контроля вдали от участков расположения арматуры. В частности, пункт 4.4 ГОСТ 17624 гласит: "...Допускается прозвучивание вдоль линии, расположенной параллельно рабочей арматуре, если расстояние от этой линии до арматуры составляет не менее 0,6 длины базы." Для ба-

зы прозвучивания 150 мм рекомендованное расстояние составляет 90 мм, что в 2,5 раза превосходит значение, полученное по формуле (1). Увеличение же базы прозвучивания до 300–400 мм приводит — в соответствии с рекомендациями ГОСТ 17624 — к полной невозможности ультразвукового контроля практически всех несущих конструкций. Целесообразность же поверхностного контроля бетона на больших базах измерения связана с возможностью оценки состояния внутренних областей бетонного массива [4].

Завышенные оценки допустимого расстояния до арматуры можно объяснить тем, что представленная в формуле (1) оценка критического расстояния до арматуры справедлива только для импульса продольной волны, регистрируемой по превышению минимального порога фронтом первого вступления сигнала. Для других вариантов регистрации в точке приема возникают условия для интерференции составляющих волнового процесса — на вторую или третью полуволну, прошедшую по бетону, может накладываться первая полуволна, прошедшая по арматуре. В результате, чем больший временной фрагмент акустического сигнала принимается во внимание при приеме, тем большей становится критическая толщина защитного слоя бетона. Это обстоятельство указывает на необходимость учета способа (алгоритма) регистрации времени распространения УЗ импульса.

Кроме того, формула (1) учитывает лишь соотношение скоростей ультразвуковых колебаний (УЗК) в бетоне и арматуре, игнорируя энергетический аспект волновых процессов. Акустический импульс, распространяющийся по стержню арматуры, испытывает сильное затухание вследствие трансформации энергии импульса в энергию распространяющихся от стержня в бетон акустических волн. В результате на больших базах измерения, вопреки формуле (1), присутствие импульса, прошедшего по арматуре в точку II, можно не зафиксировать вовсе. Кроме указанного фактора, интенсивность ультразвуковой волны, прошедшей через арматуру и достигшей точки приема II, зависит от условий ее переизлучения в точках А и А' (см. рис. 1). Рассматривая зоны А и А' арматурного стержня как полуволновые диполи, можно видеть, что в этом случае значение критической базы прозвучивания увеличится на  $\sim \lambda/2$ , что соответствует значениям  $2\Delta \approx 20-50$  мм. Как показали результаты лабораторных испытаний различных образцов, имитирующих неоднородность бетона и его армирование, присутствие импульса, прошедшего по пути I — А — А' — II удавалось обнаружить лишь при заметно большем значении базы измерения, чем это следует из формулы (1), что согласуется с предложенной выше моделью процесса переизлучения. Приращение базы даже для арматуры  $\varnothing 30$  мм и  $d = 20$  мм составило  $\sim (35-50)$  мм, что в пересчете на значение защитного слоя соответствует его уменьшению на 8–10 мм относительно расчетного. Регистрация ультразвукового сигнала проводилась по фронту сигнала при максимальной чувствительности приемного тракта прибора ("Пульсар-1.2").

Известны [5] попытки использования аналитических методов для уточненной оценки влияния армирования на скорость распространения волнового фронта в массиве. Но формализация задачи в таких случаях сталкивается с рядом трудностей, обходить которые приходится введением значительных упрощений в модель процесса, что снижает достоверность полученного результата.



1, 1\* —  $S_k = 200$  мм; 2, 2\* —  $S_k = 150$  мм;  
3, 3\* —  $S_k = 100$  мм;  
точка К соответствует значениям скоростей:  
 $v_c = 3800$  м/с,  $v_a = 5900$  м/с

Рис. 2. Зависимость критической глубины расположения арматуры от соотношения скорости распространения УЗ импульса в бетоне и арматуре

Эффективным инструментом для решения такого рода задач является метод конечных элементов (МКЭ) [6].

**МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ**

Для уточнения картины распространения УЗ импульса вдоль оси стержня стальной арматуры, находящегося в бетонном монолите, авторами исследовался виртуальный образец — конечноэлементная (КЭ) осесимметричная модель, представляющая собой цилиндр длиной 400 мм и диаметром 300 мм (рис. 3). Ось стального стержня совпадает с осью цилиндра. УЗ импульс инициировался полусинусоидальным силовым воздействием  $P(t)$  длительностью 7 мкс и амплитудой 1 Н на конец стержня. Принятые характеристики материала стержня:  $E1 = 250$  ГПа;  $\nu1 = 0,3$ ;  $\rho1 = 7800$  кг/м<sup>3</sup> соответствуют "стержневой" скорости УЗК  $v_0 = 5661$  м/с и скорости объемной продольной волны  $v_1 = 6568$  м/с. Плотность бетонного цилиндра  $\rho2$  принималась равной 2400 кг/м<sup>3</sup>.

Для моделирования использовался лицензионный пакет MSC/Nastran for Windows (лицензионное свидетельство ЕС 3428 MSC/NASTRAN for Windows 23.03.1999). Принятая дискретность разбиения модели составляла 2 мм с применением параболической интерполяции перемещений между узлами конечного элемента.

Предварительно была выполнена оценка коэффициента ослабления импульса продольной волны по мере ее распространения вдоль оси цилиндра при отсутствии армирования. Теоретически [7–9] амплитуда деформации (смещение узлов модели)  $\xi$  должна уменьшаться прямо пропорционально пройденному волной расстоянию  $Z$  в соответствии с выражением

$$\xi = \xi_0 \cdot \frac{Z_0}{Z}, \tag{2}$$

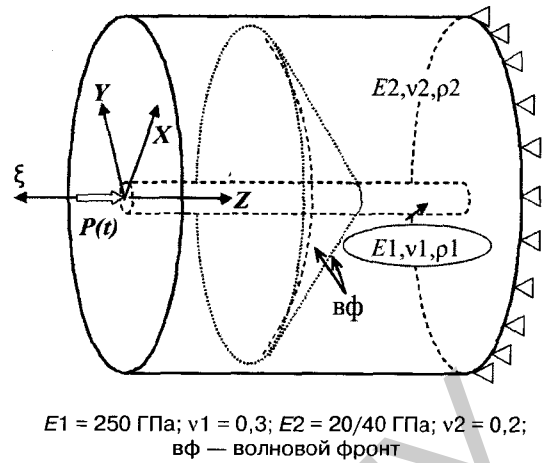
где  $Z_0$  и  $\xi_0$  — соответственно опорные координата и амплитуда деформации.

На рис. 4 приведены временные диаграммы нормированных значений упругих деформаций образца в точках, расположенных на его оси по направлению распространения волны. Цифры у вершин импульсов соответствуют координате  $Z$ . Параметры материала модели:  $E2 = 20$  ГПа;  $\nu2 = 0,2$ ;  $\rho2 = 2400$  кг/м<sup>3</sup>. Нормирование выполнялось в соответствии с выражением

$$\xi_{Norm} = \frac{\xi Z}{Z_0}, \tag{3}$$

где  $\xi_{Norm}$  — нормированная амплитуда импульса;  
 $\xi$  — фактическая амплитуда;  
 $Z_0$  — то же, что в формуле (2), принята равной 4 см.

Для однородной модели (без армирования) амплитуды волн и форма импульса (передний фронт) для  $Z \geq 8$  см оставались неизменными, что косвенно подтверждает адекватность КЭ модели. Рост амплитуды волнового импульса для  $Z < 8$  см обусловлен влиянием границы (разрывом связей по плоскости торца) модели. Фактическое значение скорости продольной волны в образце, определенное по данным модели-



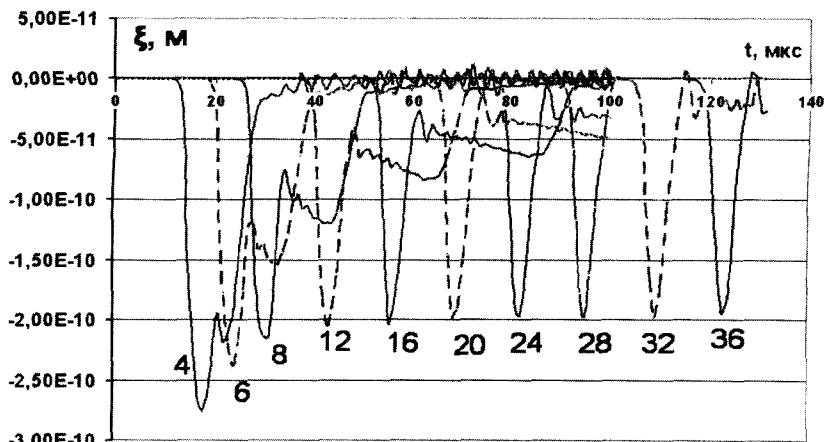
$E1 = 250$  ГПа;  $\nu1 = 0,3$ ;  $E2 = 20/40$  ГПа;  $\nu2 = 0,2$ ;  
 вФ — волновой фронт

**Рис. 3.** Моделируемый бетонный образец с армированием

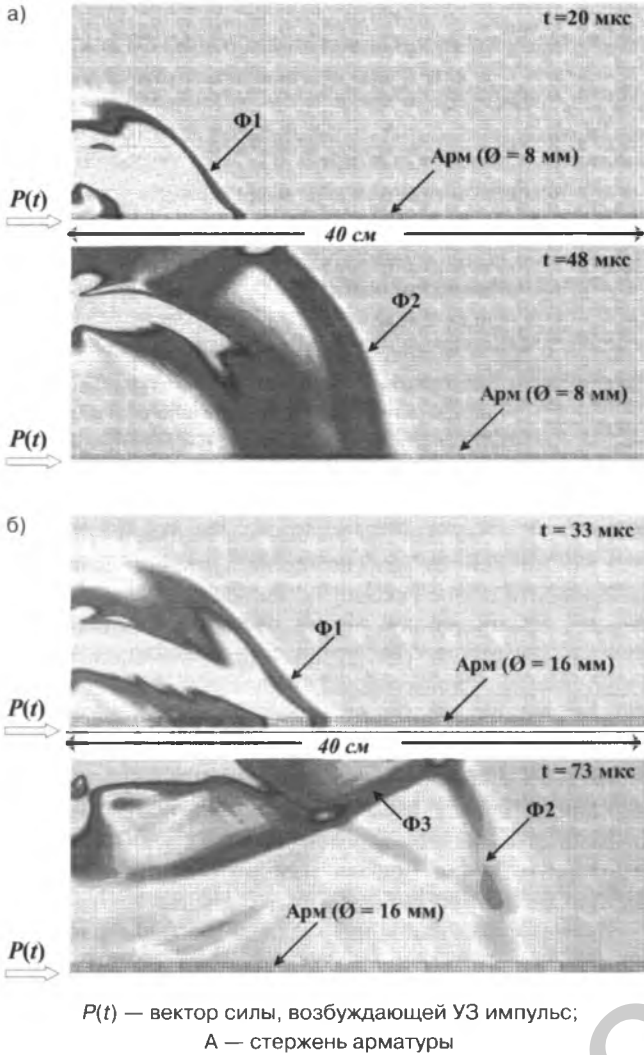
рования и формуле  $v_1^* = \Delta Z / \Delta t$ , составило 3119 м/с; расчетное (для объемной продольной волны в однородной среде с указанными выше параметрами) — 3045 м/с.

Присутствие стального стержня приводит к значительному изменению характера распространения волнового фронта импульса Ф1 (см. рис. 3 и 5), который в этом случае представляет собой конус,двигающийся вдоль оси  $Z$  со скоростью около 6000 м/с. Поскольку вершина конуса имеет малый радиус кривизны, то в этой зоне фронта будет происходить быстрое снижение интенсивности колебаний за счет передачи энергии волны в стержне волне, уходящей в массив образца. (В свободном стержне при  $d < \lambda$  импульс распространяется без затухания). Потеря интенсивности волны вершины конуса приводит к изменению формы всего волнового фронта, который по мере продвижения постепенно становится сферическим — Ф2, со скоростью распространения, приближающейся к скорости УЗК в бетонном массиве.

На рис. 5 показано распределение модулей смещений узлов в плоскости продольного сечения цилиндрической модели для различных моментов времени и диаметров армирования 8 и 16 мм. Указанные эволюции формы волнового фронта в армированном образце взаимобусловлены изменениями формы временных диаграмм акустического импульса, распространяющегося в стержне арматуры. Изменение формы импульса выражается в увеличении его длительности и отчетливом проявлении двух компонент — высокоскоростной, обус-

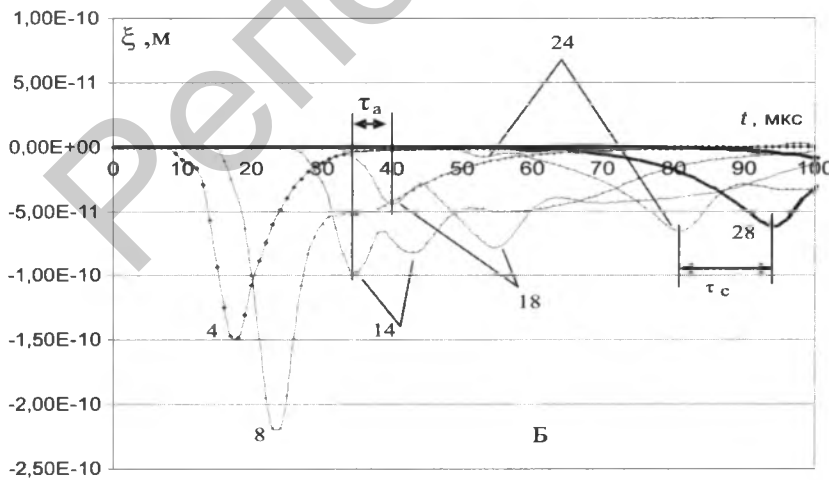


**Рис. 4.** Временные диаграммы волнового импульса для однородной модели;  $E2 = 20$  ГПа



$P(t)$  — вектор силы, возбуждающей УЗ импульс;  
 А — стержень арматуры

**Рис. 5.** Развитие волнового фронта УЗ импульса в армированном бетонном образце по данным КЭ моделирования (показана верхняя полуплоскость сечения модели) для диаметра арматуры:  
 а — 8 мм;  
 б — 16 мм



**Рис. 6.** Временные диаграммы нормализованного волнового импульса для армированного образца-модели;  
 $E_2 = 20$  ГПа,  $d = 8$  мм

ловленной присутствием стального стержня, и низкоскоростной, обусловленной влиянием бетонного массива. В начальной стадии ( $Z \leq 8$  см) распространения волны по стержню ее амплитуда затухает медленнее, чем в массиве без армирования — проявляется волноводный эффект. Дальнейшее распространение импульса происходит с возрастающим затуханием высокоскоростной компоненты; характер ее затухания экспоненциальный.

На рис. 6 и 7 приведены временные диаграммы нормированных значений упругих деформаций вдоль оси  $Z$  армированного образца с указанными выше характеристиками материала массива. Нормализация амплитуд импульсов на рис. 6 выполнялась в соответствии с формулой (3), на рис. 7 — подбором коэффициентов затухания (нормирования)  $K_{Norm,i}$ , приводящих к выравниванию амплитуд высокоскоростных импульсов.

На рис. 6 видно, что уже на расстоянии около 14 см от точки возбуждения амплитуды двух компонент сигнала практически равны, а на расстоянии 24 см высокоскоростная компонента имеет амплитуду на порядок меньшую амплитуды "бетонной" компоненты.

Для модели с диаметром арматуры 16 мм выравнивание амплитуд наблюдается для  $Z \approx 28$  см. Длительность временного интервала  $\tau_a$  составляет около 6,5 мкс. Дифференциальная (мгновенная) скорость распространения импульса  $v^d$ , рассчитанная по формуле

$$v^d = \frac{\Delta l}{\tau}, \tag{4}$$

где  $\Delta l$  и  $\tau$  соответственно, приращения базы измерения и времени распространения УЗ импульса, для  $\tau = \tau_a$  составляет 6150 м/с, что ниже скорости объемной волны в стали ( $v_l = 6568$  м/с), но больше "стержневой" скорости ( $v_0 = 5661$  м/с). На этой стадии начинает проявляться составляющая фронта импульса, обусловленная волновым процессом в ближней к арматурному стержню зоне бетона. Амплитуда этой составляющей фактически удовлетворяет условию (3). Оценка дифференциальной скорости  $v^d$  распространения составляющей фронта импульса волны дает значения, близкие к скорости продольной волны в массиве бетона:  $\tau = \tau_c = 13$  мкс;  $v_l = 0,04 / (13 \cdot 10^{-6}) = 3077$  м/с.

Полученные результаты указывают на возможность определения скорости УЗ импульса в бетоне по формуле (4), не внося каких-либо поправок на влияние арматуры, проводя измерения дифференциальной скорости распространения импульса методом профилирования в зоне расположения стержня арматуры, вплоть до измерений ее на самом стержне. В этом случае для стержня диаметром 8 мм минимальная база прозвучивания должна быть не менее 20 см, для стержня диаметром 16 мм — более 32–36 см. Такая методика позволяет обойти ограничения условия (1) при УЗК железобетонных конструкций. Кроме того, указанная методика может быть использована и для оценки неравнопрочности бетонного массива [4].

Рассматриваемая модель процесса распространения УЗ импульса представляет собой предельный случай, когда

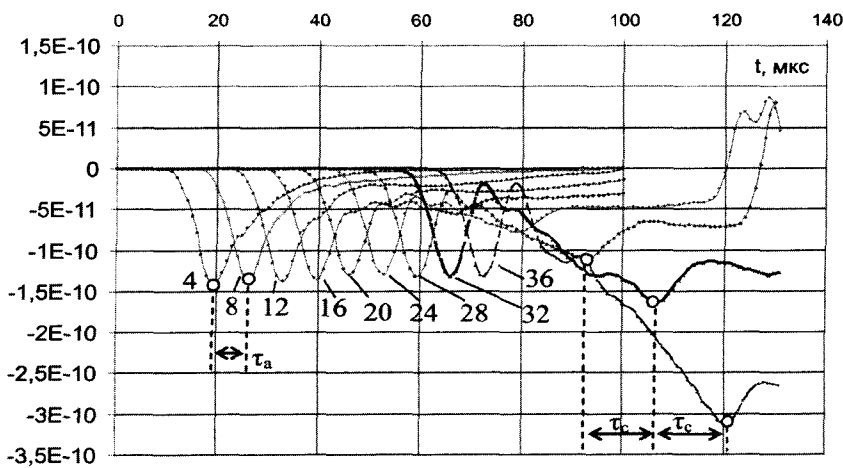


Рис. 7. Временные диаграммы нормализованного волнового импульса для армированного образца-модели;  $E_2 = 20$  ГПа,  $d = 16$  мм

Аналитическое выражение для расчета коэффициента затухания УЗ импульса в зоне стержня арматуры имеет вид

$$\frac{\xi}{\xi_0} = A \cdot e^{-B \cdot \frac{Z_0}{Z}} \quad (5)$$

Коэффициенты  $A$  и  $B$  для двух значений модуля упругости  $E$  (20 и 40 ГПа) и диаметров арматуры  $d$  (8 и 16 мм) приведены в таблице 1.

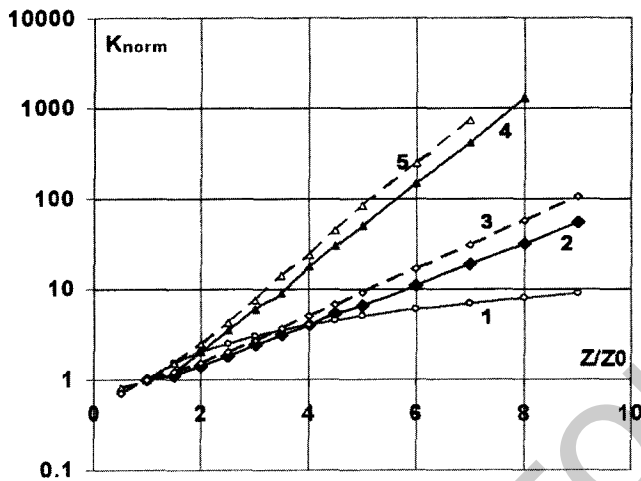
Таким образом, исследование показало существенное влияние армирования на форму распространяющегося в бетоне УЗ импульса, в котором можно выделить две компоненты, соответствующие динамическим процессам в бетоне и стальном стержне. Соотношение их амплитуд зависит от базы измерения, что проявляется в

зависимости оценки скорости распространения УЗ импульса в армированном бетоне от базы измерения и от метода (алгоритма) регистрации принятого акустического сигнала. Селективный, без взаимного влияния, прием указанных составляющих УЗ импульса можно осуществить на основе методики профилирования с оценкой их дифференциальной скорости. Кроме того, зависимость затухания УЗ импульса в арматурном стержне от характеристик контактного слоя может рассматриваться как основа измерительной методики оценки сцепления арматуры с бетоном.

Заметим, что наиболее простым образом рассмотренная методика селективной оценки скорости ультразвука в бетоне в зоне влияния армирования может быть реализована с использованием электроакустических преобразователей (ЭАП), имеющих малое время реверберации, то есть формирующих одиночные зондирующие УЗ импульсы. К сожалению, на сегодняшний день можно лишь констатировать отсутствие на рынке приборных средств, обладающих указанными качествами (существующие приборы, а это, в первую очередь, приборы серии "Пульсар" и УК-1401, формируют квазипериодические УЗ импульсы большой длительности — более 100 мкс).

Вопрос выбора способа регистрации УЗ импульса, прошедшего через бетон, имеет более широкий аспект, чем рассмотренный выше, поскольку связан с общей метрологической проблемой оценки скорости ультразвука в дисперсной среде. Проблема в данном случае заключается в том, что при выборе измерительного алгоритма разработчики ультразвуковых приборов контроля бетона вынуждены принимать во внимание два взаимоисключающих критерия:

- обеспечение принципа аддитивности при оценке скорости УЗ сигнала в бетоне для переменных баз прозвучивания;
- минимизация влияния границ (и крупных неоднородностей, включая армирование) контролируемого изделия на оценку скорости ультразвука.



1 — бетон без армирования; с арматурой:  
2 —  $d = 16$  мм,  $E_{cm} = 20$  ГПа; 3 —  $d = 16$  мм,  $E_{cm} = 40$  ГПа;  
4 —  $d = 8$  мм,  $E_{cm} = 20$  ГПа; 5 —  $d = 8$  мм,  $E_{cm} = 40$  ГПа

Рис. 8. Зависимость коэффициента затухания УЗ импульса в арматуре армированного бетонного образца

импульс возбуждается в самом стержне арматуры. Можно предположить, что возбуждение импульса в точках, расположенных на некотором расстоянии от стержня, приведет к дополнительному уменьшению минимальной базы прозвучивания, позволяющей осуществить селекцию информационной составляющей импульса.

На рис. 8 показаны зависимости коэффициента затухания  $K_{Norm}$  от относительного расстояния распространения  $Z/Z_0$  ( $Z_0$  принималось равным 4 см).

Масштаб графиков по вертикали логарифмический. Увеличение значений модуля упругости массива бетона  $E_{cm}$  приводит к увеличению затухания. Заметного влияния изменений коэффициента Пуассона бетона (в интервале значений 0,18–0,25) на коэффициент затухания УЗ импульса не выявлено.

Таблица 1

Диаметр арматуры $d$ , мм		8		16	
Модуль упругости $E \cdot 10^{-9}$ , Па		20	40	20	40
Коэффициент	$A$	1,72	1,92	2,78	2,05
	$B$	0,272	0,513	1,050	0,592

Взаимоисключающими их можно называть лишь в том смысле, что достигаются они разными способами.

Конечные размеры образца и крупные неоднородности проявляют себя в изменении скорости импульсного акустического сигнала только в том случае, если в точке приема может быть зафиксирована волна, отраженная от границ образца, или прошедшая по неоднородным включениям. А это зависит от чувствительности приемного тракта и алгоритма обработки принятого сигнала. Теоретически, в идеализированном случае, при неограниченной чувствительности приемника и регистрации акустического импульса по превышению его фронтом минимального порога, размеры образца и близость границ к пути прохождения УЗ импульса не должны влиять на регистрируемую скорость распространения акустического импульса, которая будет равна скорости объемной продольной волны. Реальные условия измерений далеки от идеальных, главным образом, из-за ограничения чувствительности приемного тракта приборов внутренними и внешними шумами. Повышение же амплитуды зондирующего импульса ограничено возможностями УЗ излучателей и большим затуханием ультразвука в бетоне. А большие потери энергии УЗ импульса в точках взаимодействия с бетоном приобрели популярность преобразователей с СТК (сухой точечный акустический контакт) увеличивают затухание до такой степени, что зафиксировать передний фронт импульса на приеме становится затруднительным уже при базах измерения, превышающих 0,4–0,6 м.

Аддитивность результатов измерения времени прохождения УЗ импульса может быть в значительной степени обеспечена сужением спектра зондирующего сигнала, например, использованием "длинного" во временной области квазимонохромного сигнала, состоящего из нескольких периодов синусоиды. Это, с одной стороны, исключает частотную дисперсию скорости спектральных составляющих сигнала, поскольку остается практически одна частотная компонента, а с другой — за счет регистрации нескольких периодов сигнала позволяет повысить отношение сигнал/шум на приеме, что способствует точности измерения и дает возможность заметно увеличить базу измерения. Но "длинный" УЗ импульс (или только его начальная часть) может успеть отразиться от граней и неоднородностей образца ограниченных размеров и интерферировать в точке приема с "хвостом" сигнала, пришедшего в точку приема раньше — по прямому короткому пути. Это приведет к фазовым сдвигам УЗ сигнала в точке приема, а значит, и к искажению оценки времени распространения импульса. Использование же короткого зондирующего сигнала или, что эквивалентно регистрации времени распространения сигнала по его начальной части, например, по фронту первого вступления, позволяет не учитывать на небольших базах близость границ изделия, но приводит к проявлению частотной дисперсии из-за расширения спектра сигнала, и как следствие — к потере аддитивности результатов измерения времени распространения УЗ импульса в бетоне на переменных базах. Такой алгоритм измерения удобен на фиксированных базах.

Надо заметить, что производители ультразвуковых приборов для бетона не афишируют используемый измерительный алгоритм, составляющий, очевидно, их "know how", заставляя пользователя лишь о нем догадываться по каким-либо косвенным проявлениям. Поэтому отрадным является то, что в современные ультразву-

ковые приборы, в частности в "Пульсар-1.2", разработчики "вернули" функцию визуализации принятого акустического сигнала, давая достаточно квалифицированному пользователю возможность самостоятельно проанализировать его. Но при этом открытым остается вопрос оценки характера исходного излучаемого импульса, поскольку анализировать изменения принятого акустического сигнала имеет смысл, сопоставляя его с излученным. В противном случае возможно лишь сравнение принятых сигналов для разных позиций установки ЭАП на изделии. В связи с этим целесообразно, по мнению авторов, ввести в практику ультразвукового импульсного метода контроля бетона нормирование характеристик зондирующего акустического импульса (его формы и амплитуды) и используемый алгоритм его регистрации и обработки на приеме. Это, с одной стороны, обеспечит сопоставимость результатов контроля бетона разными приборами и в разных условиях их использования, а с другой — повысит информативность контроля. И в этом направлении ультразвуковой метод контроля бетона и его приборная база еще далеки от совершенства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 Степень влияния армирования (и неоднородности в массиве бетона) на скорость распространения акустического импульса не является однозначной и зависит не только от степени армирования и близости расположения стержней арматуры к зоне контроля, но и от способа регистрации ультразвукового сигнала тем или иным ультразвуковым прибором, а также от ряда других технических характеристик, многие из которых в настоящее время не нормируются. Поэтому попытки учета влияния армирования на оценку скорости распространения импульсного акустического сигнала при поверхностном прозвучивании бетона без учета особенностей измерительного алгоритма прибора простым введением каких-либо поправочных коэффициентов не имеют, по мнению авторов, практической перспективы, принимая также во внимание сложность и изменчивость интерференционной картины в точке приема волны.
- 2 Минимизировать влияние армирования при поверхностном контроле бетона с использованием стандартных методик измерения можно "диагональной" ориентацией прибора на поверхности изделия — направление прозвучивания составляет угол  $\sim 45^\circ$  относительно стержней армирования. Это позволяет для тяжелых бетонов класса  $C^{16}/_{20}$  и выше (для базы измерения 120 мм при шаге армирования более 150 мм) не учитывать наличие арматуры в зоне контроля, если толщина защитного слоя превышает 15 мм (для арматуры диаметром до 20 мм). Для диаметра арматуры 25 мм минимальная толщина защитного слоя 20 мм. Указанная рекомендация справедлива (см. пункт 1) только для приборов, оценивающих скорость распространения УЗ импульса по фронту первого вступления сигнала ("Пульсар-1.1/1.2", УК-14П). Также рекомендуется в процессе обработки результатов измерений осуществлять их селекцию, сопоставляя данные контроля, полученные с потенциально разной степенью влияния армирования.
- 3 В качестве дополнительного информационного параметра, позволяющего зафиксировать сам факт

- присутствия в зоне контроля какой-либо неоднородности, может рассматриваться длительность первой полуволны принятого акустического импульса, что согласуется с известными [10] рекомендациями по повышению информативности ультразвукового контроля бетона.
- 4 С целью повышения информативности контроля и сопоставимости результатов измерений разными типами приборов представляется целесообразным введение нормирования ряда основных технических характеристик приборов ультразвукового импульсного метода контроля бетона, включая, в первую очередь, алгоритм обработки принятого УЗ импульса, а также характеристики излучаемого зондирующего импульса.
  - 5 Установлена принципиальная возможность селективного приема составляющих УЗ импульса, распространяющегося в бетонном массиве вдоль арматурного стального стержня в зоне его влияния на скорость распространения УЗ импульса по критерию условия (1), используя методику профилирования с оценкой дифференциальной скорости распространения. Это позволяет при реализации предложенной методики устранить влияние арматуры на оценку скорости УЗ импульса в бетоне на больших (более 300 мм) базах измерения.
  - 6 Исследованиями для стальной арматуры диаметрами 8 и 16 мм определены расчетные значения минимальных баз измерения, для которых приведенная (см. пункт 4) методика становится реализуемой на основе традиционных алгоритмов обработки принятого УЗ импульса, с применением ЭАП, имеющих низкую реверберацию. Получены расчетные оценки коэффициента затухания УЗ импульса в одиночном арматурном стержне, находящемся в бетонном массиве.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624-87. — Введ. 01.01.88. — М., 1988. — 12 с.
2. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В. В. Клюев [и др.], под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1995. — 347 с.
3. Брожовски, И. Определение глубины трещин в монолитном бетоне с применением ультразвукового импульсного метода / И. Брожовски, И. Брожовски мл. // Технология строительства и реконструкции: проблемы и решения: сб. науч. тр. междунар. конф. "TCR-2004", посвященной 85-летию БНТУ / под ред. Б. М. Хрусталева. — Минск, 2006, т. 1. — С. 64–68.
4. Снежков, Д. Ю. Профилирование как метод оценки неравнопрочности массива бетона неразрушающими методами / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Строительство и архитектура. — 2008. — № 1. — С. 102–109.
5. Suarez-Antola, R. The meaning of transit times in NDT of reinforced concrete / R. Suarez-Antola // IV Conferencia Panamericana de END. Buenos Aires — Octubre 2007.
6. Снежков, Д. Ю. Неразрушающий контроль бетона в монолитном строительстве: совершенствование средств и методов / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович. — Минск: БНТУ, 2006. — 218 с.
7. Гринченко, В. Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В. Т. Гринченко, В. В. Мелешко. — Киев: Наукова думка, 1981. — 284 с.
8. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. — М.: Наука, 1972. — 736 с.
9. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / редкол.: И. П. Голямина [и др.]. — М.: Советская энциклопедия, 1979. — 396 с.
10. Штенгель, В. Г. Ультразвуковой контроль структуры бетона / В. Г. Штенгель // В мире неразрушающего контроля. — 2004. — № 1(23). — С.4–7.

Статья поступила в редакцию 03.02.2009.