

УДК 620.179.1

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-136-141

Измерение коэффициента затухания ультразвуковых волн в неоднородных материалах при одностороннем доступе

В.Г. Карташев, Э.И. Трунов

Рассмотрен усовершенствованный метод измерения коэффициента затухания ультразвуковых волн в объектах из материалов с неоднородной структурой при одностороннем доступе к объектам. Основное назначение метода — оценка состояния структуры ответственных крупногабаритных объектов из бетона, чугуна и других сложноструктурных материалов с целью предупреждения возможных аварий и катастроф. Коэффициент затухания ультразвуковых волн определяется посредством обработки реализаций структурного шума, возникающего в результате отражения зондирующего сигнала от многочисленных неоднородностей объекта. Предложен усовершенствованный алгоритм обработки реализаций структурного шума, позволяющий повысить точность измерений, расширить границы применимости метода и одновременно упростить процедуру обработки принимаемых сигналов. Исследованы вопросы оптимизации параметров зондирующего сигнала и характеристик преобразователей.

Для проверки эффективности предложенного метода и нового алгоритма обработки реализаций структурного шума проведен ряд экспериментов. Выполнены измерения коэффициента затухания продольной ультразвуковой волны в специально изготовленном бетонном блоке. Измерения проводили двумя методами: классическим теневым и с помощью предлагаемого метода, основанного на обработке реализаций структурного шума. Эксперименты показали хорошие результаты: точность измерений увеличена почти в 10 раз по сравнению с предыдущим вариантом предлагаемого метода.

Наиболее целесообразная область применения предлагаемого метода — мониторинг состояния структуры ответственных крупногабаритных объектов из материалов с неоднородной структурой (плотины, опоры мостов) в ситуациях, когда невозможно использовать другие ультразвуковые методы неразрушающего контроля, например, основанные на измерении скорости ультразвуковых волн.

Ключевые слова: неоднородный материал, структурный шум, затухание ультразвуковых волн, измерение коэффициента затухания, неразрушающий контроль.

Для цитирования: Карташев В.Г., Трунов Э.И. Измерение коэффициента затухания ультразвуковых волн в неоднородных материалах при одностороннем доступе // Вестник МЭИ. 2018. № 6. С. 136—141. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-136-141.

Measuring the Ultrasonic Wave Attenuation Coefficient in Heterogeneous Materials under Unilateral Access Conditions

V.G. Kartashev, E.I. Trunov

The article considers an improved method for measuring the ultrasonic wave attenuation coefficient in objects made of materials with a heterogeneous structure under the conditions of unilateral access to objects. The method is primarily aimed at assessing the structural condition of critical bulky objects made of concrete, cast iron, and other intricately structured materials with a view to prevent possible accidents and disasters. The ultrasonic wave attenuation coefficient is determined by processing the realizations of structural noise resulting from the reflection of a probing signal from numerous heterogeneities in the object. The article suggests an improved algorithm for processing the realizations of structural noise, the use of which makes it possible to obtain better accuracy of measurements, to expand the applicability limits of the method, and to simplify the received signals processing procedure. Matters concerned with optimizing the probing signal parameters and the transducer characteristics are studied.

A number of experiments were carried out for checking the efficiency of the proposed method and of the new algorithm for processing structural noise realizations. Measurements of the longitudinal ultrasonic wave attenuation coefficient in a specially fabricated concrete block were carried out. The measurements were carried out using two methods: the classic shadow method and the proposed method based on processing the structural noise realizations. The experiments showed good results: the measurement accuracy has been improved by almost 10 times compared with the previous version of the proposed method.

The most appropriate application field of the proposed method is monitoring the structural state of critical bulky objects made of materials with a heterogeneous structure like dams and bridge supports under the conditions in which it is impossible to apply other ultrasonic non-destructive testing methods, e.g., those based on ultrasonic wave velocity measurements.

Key words: heterogeneous material, structural noise, ultrasonic wave attenuation, attenuation coefficient measurements, non-destructive testing.

For citation: Kartashev V.G., Trunov E.I. An Improved method for Measuring the Ultrasonic Wave Attenuation Coefficient in Heterogeneous Materials through Processing Structural Noise Realizations. MPEI Vestnik. 2018;6:136—141. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-146-141.

Постановка задачи

Актуальной задачей является контроль состояния бетонных зданий и сооружений с целью предотвращения возможных аварий и катастроф. Для оценки прочности бетонных конструкций, находящихся в эксплуатации, используются методы неразрушающего контроля, среди которых широко распространены методы ультразвукового (УЗ) контроля [1].

Методы УЗ-контроля бетонных конструкций основаны на том, что характеристики УЗ-волн в бетоне (фазовая скорость и погонное затухание) связаны с прочностью бетона. При приближении к порогу разрушения, когда в бетоне возникают микротрещины, скорость УЗ-волны уменьшается, а коэффициент затухания увеличивается. Взаимосвязь скорости УЗ-волн и прочности бетона хорошо изучена и описана в литературе [2]. Методика определения прочности бетона посредством измерения скорости УЗ-волн детально разработана и регламентирована государственным стандартом [3].

Скорость УЗ-волн в бетоне обычно определяют или теневым или эхо-методами посредством измерения временной задержки сигнала, прошедшего через толщу бетонной конструкции. При диагностике очень крупных объектов, таких как плотины, опоры мостов, затухание УЗ-волн бывает настолько сильным, что не удается обнаружить сигнал, прошедший через толщу бетона, и измерение становится невозможным. В этом случае единственным источником информации о структуре объекта остается структурный шум (СШ), возникающий в результате отражения зондирующего сигнала от многочисленных неоднородностей материала.

Аналогичная проблема возникает при контроле массивных изделий из чугуна [4], например контейнеров для радиоактивных материалов. Большая толщина стенки и возможность только одностороннего доступа исключают применение традиционных методов УЗ-контроля.

Структурный шум (СШ) — нестационарный случайный процесс, дисперсия которого убывает во времени. Скорость убывания дисперсии зависит от различных факторов, в том числе от коэффициента затухания УЗ-волны, что создает принципиальную возможность измерения коэффициента затухания УЗ-волн в зондируемом материале.

Идея метода определения коэффициента погонного затухания УЗ-волн посредством обработки реализаций СШ была впервые предложена в [5]. Детальная разработка метода и его экспериментальная проверка проведены в [6].

Сложность обработки реализаций СШ вызвана тем, что закон изменения дисперсии СШ во времени определяется не только погонным затуханием УЗ-волны в среде, но и другими побочными факторами: параметрами зондирующего сигнала, диаграммой направленности преобразователей и расстоянием между

излучающим и приемным преобразователями. Методика учета побочных факторов разработана в [6], где введена функция $\sigma_0^2(t)$, описывающая закон изменения дисперсии СШ при отсутствии затухания УЗ-волны в среде, подробно представлена процедура вычисления этой функции.

Алгоритм обработки реализаций СШ, предложенный в [6], состоит из следующих этапов. Сначала из реализации СШ удаляют нерабочие участки: в начале реализации, где находится электроакустическая наводка, и в конце реализации, где заметный вклад вносит белый шум (собственный шум аппаратуры). Затем реализацию СШ возводят в квадрат и интегрируют в скользящем окне. Получающуюся при этом зависимость дисперсии СШ от времени делят на функцию $\sigma_0^2(t)$ и умножают на t . Умножение на t необходимо для того, чтобы учесть сужение спектра сигнала из-за частотно-зависимого затухания УЗ-волны в среде. После этого выполняют логарифмирование полученной функции и ее аппроксимацию линейной функцией с помощью процедуры линейной регрессии. Угол наклона линейной функции определяет искомый коэффициент затухания УЗ-волны в нулевом приближении. Для получения более точного результата в [6] предложено использовать корректирующую функцию, вид которой зависит от параметров зондирующего сигнала и характеристик исследуемого объекта.

Проведена экспериментальная проверка метода посредством измерения коэффициента затухания УЗ-волны в бетонном блоке в течение нескольких дней в процессе затвердевания бетона. Измерения проводили как классическим теневым, так и с помощью разрабатываемого, методами. Сравнение результатов измерений показало, что предложенный метод правильно передает динамику изменения коэффициента затухания во времени, но абсолютные значения коэффициента затухания, полученные с помощью разных методов, различались примерно на 25%. Таким образом, проведенный эксперимент, с одной стороны, подтвердил работоспособность нового метода и, с другой стороны, выявил его недостатки и ограничения.

Настоящая работа посвящена модернизации метода с целью повышения точности измерений и расширения границ его применимости.

Модернизация алгоритма обработки реализаций структурного шума

Основным недостатком метода измерения коэффициента затухания УЗ-волны, предложенного в [6], является громоздкость математических преобразований, выполняемых в процессе обработки реализаций СШ. Наиболее трудоемким этапом обработки является вычисление корректирующей функции и подбор для нее аппроксимирующего выражения. Предложенный метод изначально был ориентирован на диагностику сред с очень большим коэффициентом затухания УЗ-волн и

использование зондирующих сигналов с очень большой шириной спектра. Если же затухание ультразвука в среде не так велико, а зондирующий сигнал имеет не очень широкий спектр (не шире 50%), то вычисление корректирующей функции вызывает значительные трудности, а точность измерений коэффициента затухания УЗ-волны снижается. В связи с этим необходима модернизация алгоритма обработки реализаций СШ.

Для разработки более совершенного алгоритма проведено дополнительное исследование. Установлено, что прежний алгоритм хорошо работает, если затухание УЗ-волны в среде и ширина спектра зондирующего сигнала настолько велики, что на всем рабочем участке реализации СШ составляющие спектра сигнала на верхней частоте ослабляются по сравнению с составляющими спектра на нижней частоте более чем на 20 дБ. Если же затухание ультразвука в среде и ширина спектра зондирующего сигнала не столь велики, приходится вводить корректирующую функцию, которая получается тем сложнее, чем меньше ширина спектра сигнала и затухание ультразвука в среде.

Объяснение этого факта состоит в следующем. В алгоритме, описанном в [6], предполагается, что объект зондируют широкополосным сигналом, форма спектра которого близка к прямоугольной. Вследствие частотно-зависимого затухания ультразвука в среде высокочастотные составляющие спектра сигнала ослабляются сильнее, чем низкочастотные, в результате чего спектр искажается и сужается. Это приводит к дополнительному уменьшению дисперсии СШ.

Пусть энергетический спектр зондирующего сигнала и, соответственно, энергетический спектр СШ в самый начальный момент времени $t = 0$ равен W_0 в полосе частот от ω_0 до ω_1 и равен нулю за пределами этой полосы частот. Через некоторое время t энергетический спектр СШ, вследствие частотно-зависимого затухания УЗ-волн в среде, выглядит как

$$W(\omega, t) = W_0 e^{-2\alpha_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^n t}, \quad (\omega_0 < \omega < \omega_1), \quad (1)$$

где α_0 — коэффициент затухания УЗ-волны на частоте ω_0 ; n — показатель, описывающий характер зависимости коэффициента затухания от частоты, для большинства материалов $1 < n < 2$.

Чтобы найти характер зависимости дисперсии СШ от времени вследствие частотно-зависимого затухания, нужно проинтегрировать (1) по частоте:

$$\sigma_{\text{зат}}^2(t) = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_0}^{\omega_1} W_0 e^{-2\alpha_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^n t} d\omega. \quad (2)$$

Для упрощения расчетов обозначим $\omega/\omega_0 = w$, $\omega_1/\omega_0 = w_1$ и положим $n = 1$, в этом случае интеграл (2) равен

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{зат}}^2(t) &= \frac{W_0 \omega_0}{2\alpha_0 t} \left[e^{-2\alpha_0 t} - e^{-2\alpha_0 w_1 t} \right] = \\ &= \frac{W_0 \omega_0}{2\alpha_0 t} e^{-2\alpha_0 t} \left[1 - e^{-2\alpha_0 t(w_1 - 1)} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Если затухание УЗ-волны в среде велико и зондирующий сигнал имеет очень широкий спектр, то $e^{-2\alpha_0 t(w_1 - 1)} \ll 1$ и выражение (3) упрощается

$$\sigma_{\text{зат}}^2(t) \approx \frac{W_0 \omega_0}{2\alpha_0 t} e^{-2\alpha_0 t}. \quad (4)$$

Согласно (4) влияние частотно-зависимого затухания на характер временной зависимости дисперсии СШ сводится к убыванию пропорционально $e^{-2\alpha_0 t}$ и обратно пропорционально времени t . Поэтому, согласно классическому алгоритму, для определения искомого коэффициента затухания α_0 нужно функцию, описывающую дисперсию СШ разделить на $\sigma_0^2(t)$ и умножить на t . Получающаяся в результате этой операции функция будет меняться пропорционально $e^{-2\alpha_0 t}$, откуда с помощью операции логарифмирования можно легко найти коэффициент α_0 .

Если затухание УЗ-волн в среде не очень велико, то приближенная формула (4) оказывается справедливой только при достаточно больших t . При этом начальная часть реализации СШ — нерабочая. Приходится вводить корректирующую функцию, что усложняет процесс обработки реализаций СШ. Чем меньше затухание УЗ-волн в среде, тем шире нерабочий участок реализации СШ и труднее построение корректирующей функции.

Для устранения этого недостатка предложен усовершенствованный алгоритм обработки реализаций СШ, который состоит в следующем. Вместо приближенного выражения (4) следует использовать более точную формулу (3). В соответствии с этим при обработке реализаций СШ нужно функцию, описывающую дисперсию СШ, умножить на более сложное выражение

$$f(t) = \frac{t}{\sigma_0^2(t) \left[1 - e^{-2\alpha_0 t(w_1 - 1)} \right]}.$$

Для проверки эффективности проведено математическое моделирование обработки реализаций СШ с помощью старого и нового алгоритмов. Предполагалось, что реализации СШ получены экспериментально, но без флуктуаций. Результаты моделирования в виде графиков зависимости логарифма дисперсии СШ от времени показаны на рис. 1. При обработке реализаций СШ графики логарифма дисперсии СШ должны аппроксимироваться линейными функциями, угол наклона которых определяет коэффициент затухания УЗ-волны. В идеальном варианте график логарифма

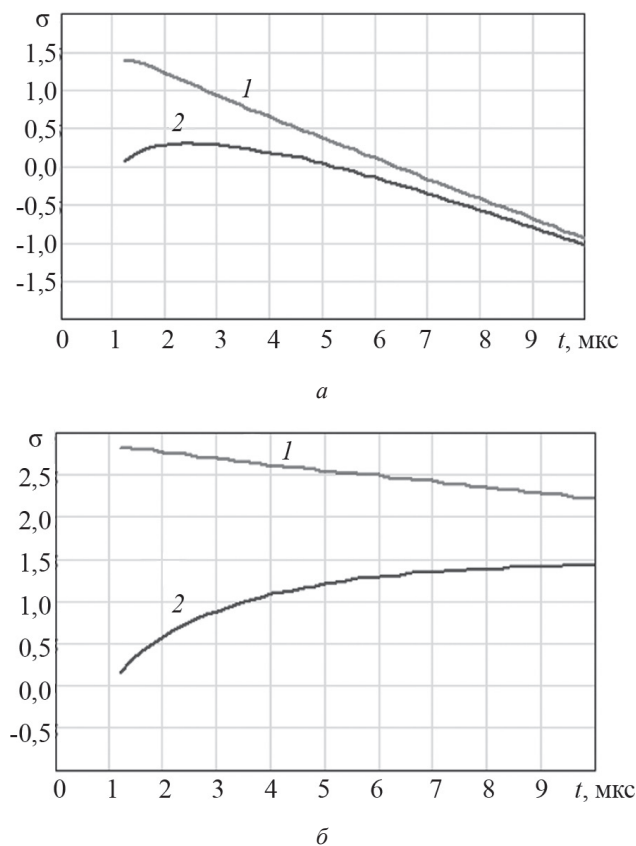


Рис. 1. Функция, пропорциональная логарифму дисперсии СШ после обработки с помощью предложенного (1, $LQ(t)$) и классического (2, $LS(t)$) алгоритмов при затухании УЗ-волны в среде 40 (а) и 10 (б) дБ/м

дисперсии на рабочем участке реализации СШ должен представлять собой прямую линию. Чем меньше отличие этого графика от прямой, тем точнее аппроксимация и выше точность определения измеряемого коэффициента затухания УЗ-волны.

При использовании старого алгоритма графики логарифма дисперсии СШ существенно отличаются от прямой линии, и для исправления этого недостатка приходится вводить корректирующую функцию. Она получается сравнительно простой при сильном затухании УЗ-волн в среде (см. рис. 1, а), и значительно более сложной, если затухание УЗ-волн невелико (рис 1, б). График логарифма дисперсии СШ, построенный с помощью нового алгоритма, на всем протяжении описывается линейной функцией, так что нет необходимости в корректирующей функции. Преимущества алгоритма особенно заметны при небольшой величине затухания ультразвука в среде, когда работоспособность старого алгоритма вызывает сомнения.

Дополнительные исследования, проведенные с новым алгоритмом, показали, что он дает хорошие результаты даже, если априорное значение коэффициента затухания сильно отличается от фактического. В этом случае возможен итерационный процесс, который сходится уже после первой итерации.

Выбор параметров зондирующего сигнала и преобразователей

Вопрос о выборе типа зондирующего сигнала затрагивался в [6]. Было установлено, что зондирующий сигнал должен иметь спектр, близкий по форме к прямоугольному. Таким свойством обладает сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-импульс) с большой базой.

Для определения оптимального значения базы сигнала проведено специальное исследование. Если ЛЧМ-импульс имеет небольшую базу (около 10), то его спектр заметно отличается от нуля на частотах ниже ω_0 . При прохождении через среду с частотно-зависимым затуханием низкочастотные составляющие спектра такого сигнала «поднимаются» и спектр сигнала смещается в сторону низких частот (ниже ω_0). Для подобного сигнала расчетные формулы, используемые для определения коэффициента затухания УЗ-волны, оказываются непригодными, поскольку приводят к значительным ошибкам. Поэтому база сигнала должна быть такой, чтобы составляющие спектра сигнала на частотах ниже ω_0 были пренебрежимо малы даже после прохождения через среду с частотно-зависимым затуханием.

Определено минимально допустимое значение базы ЛЧМ-импульса $B = 50$. Если позволяют возможности аппаратуры, можно использовать сигналы с базой 100 и более. Однако брать сигналы с очень большой базой нецелесообразно, так как это усложнит аппаратуру, но не приведет к повышению точности измерений.

Важным вопросом является выбор размера апертуры преобразователей.

В расчетных формулах для определения коэффициента затухания УЗ-волны используются диаграммы направленности преобразователей. Следовательно, этими формулами можно пользоваться там, где применимо понятие диаграммы направленности, т.е. в дальней зоне преобразователей на расстоянии более D^2/λ , где D — размер апертуры преобразователя. Использование их для области ближе D^2/λ приведет к большим погрешностям, поэтому часть реализации СШ, формирующаяся отражениями от неоднородностей, расположенных ближе границы дальней зоны, является нерабочей и должна быть удалена. Это обстоятельство накладывает ограничения на выбор размеров преобразователей. Не следует применять преобразователи с апертурой большого размера, существенно превышающей длину волны. Данное ограничение особенно важно при контроле металлов (чугуна, бронзы), когда частота зондирующего сигнала составляет 1...5 МГц, а длина УЗ-волны равна нескольким миллиметрам.

Результаты эксперимента

Для проверки работоспособности метода и оценки эффективности предложенного алгоритма обработки реализаций СШ проведен эксперимент. В качестве объекта исследования использован специально из-

готовленный блок из бетона марки М300 размером 600×600×350 мм. Измерена скорость продольных УЗ-волн в блоке, оказавшаяся равной 3100 м/с.

Объект зондировали с помощью датчика продольных акустических волн типа S0208 фирмы АКС с апертурой диаметром 25 мм (рис. 2). Измерения теньевым методом производили с помощью дефектоскопа А1220 MONOLITH. Для реализации метода использовали разработанный в НИУ «МЭИ» многофункциональный автоматизированный измерительный комплекс [7].

При измерении затухания теньевым методом применяли зондирующий сигнал в виде одного периода синусоиды с частотой 50 кГц. Зондирование проходило в трех местах бетонного блока, результаты измерений усредняли. Среднее значение коэффициента затухания равно 45 дБ/м.

При измерении коэффициента затухания УЗ-волны с помощью структурного шума в качестве зондирующего сигнала брали ЛЧМ-импульс с базой $B = 250$, спектр которого располагался в пределах от 50 до 100 кГц. Зондирование выполняли в 10 местах бетонного блока. Реализации СШ сохраняли в памяти компьютера. У каждой реализации удаляли нерабочие участки: начальный, длительностью 33 мкс, где располагалась наводка, и конечный, после 240 мкс, где существовали помехи белого шума и донного сигнала (рис. 3).

После удаления нерабочих участков каждую реализацию СШ обрабатывали в соответствии с изложенным алгоритмом. Для каждой реализации вычисляли значение коэффициента затухания УЗ-волны, после чего определяли среднее значение (равно 43,5 дБ/м). Поскольку бетон — материал очень неоднородный, и разброс результатов измерения коэффициентов затухания в разных местах бетонного блока достигает $\pm 30\%$, то такое совпадение результатов измерений разными методами можно считать хорошим.

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать предварительные выводы о целесообразности области применения разработанного метода.

Особенностью большинства неоднородных материалов является большой разброс коэффициента затухания УЗ-волн в разных местах объекта. Кроме того, коэффициент затухания сильно зависит от частоты. Скорость УЗ-волн значительно стабильнее, поэтому

Литература

1. Березин Е.К., Родиошкин В.М. Методы ультразвукового контроля качества материалов со сложной структурой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 5. С. 32—39.
2. Щелчков В.А., Ипатов Д.А., Того И. Ультразвуковой контроль прочности бетона // Политехническая неделя в Санкт-Петербурге: Материалы науч. форума с междунар. участием. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского политех. ун-та им. Петра Великого, 2016. С. 297—299.



Рис. 2. Датчик S0208

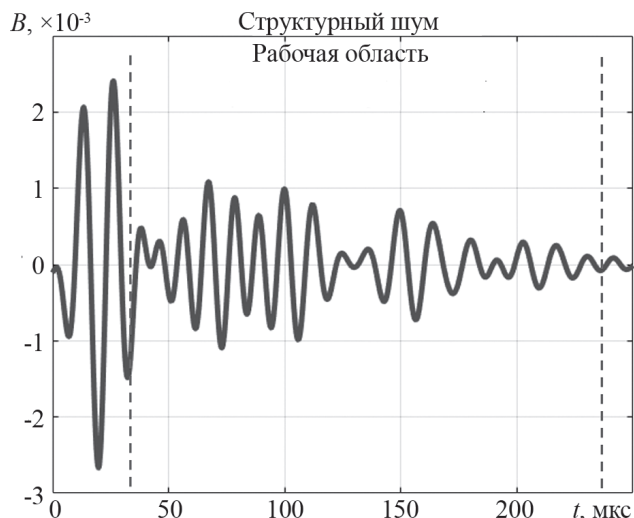


Рис. 3. Реализация структурного шума:
 B — амплитуда

именно она используется для контроля состояния объектов из неоднородных материалов. Использование для контроля объектов методов, основанных на измерении коэффициента затухания УЗ-волн, целесообразно только в тех случаях, когда измерение скорости УЗ-волн невозможно.

В связи с этим, наиболее целесообразной областью применения предлагаемого метода является мониторинг состояния структуры крупногабаритных объектов посредством зондирования в одном и том же месте объекта (с помощью постоянно закрепленного датчика) при неизменных параметрах зондирующего сигнала и алгоритма обработки реализаций СШ.

References

1. Berezin E.K., Rodyushkin V.M. Metody Ul'trazvukovogo Kontrolya Kachestva Materialov so Slozhnoy Strukturoy. Uprochnyayushchie Tekhnologii i Pokrytiya. 2006;5:32—39. (in Russian).
2. Shchelchikov V.A., Ipatov D.A., Togo I. Ul'trazvukovoy Kontrol' Prochnosti Betona. Politekhnicheskaya Nedelya v Sankt-Peterburge: Materialy Nauch. Forumy s Mezhdunar. Uchastiem. Spb.: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo Politekh. Un-ta im. Petra Velikogo, 2016:297—299. (in Russian).

3. ГОСТ 17624—87. Ультразвуковой метод определения прочности бетона.

4. **Воронкова Л.В.** Определение прочности чугуна ультразвуковым методом // Контроль. Диагностика. 2011. № 12. С. 62—64.

5. **Карташев В.Г.** Измерение коэффициента ослабления ультразвука в материале с неоднородной структурой при одностороннем доступе // Вестник МЭИ. 2013. № 4. С. 110—114.

6. **Карташев В.Г., Фадин А.С., Трунов Э.И., Али Зайд Салех Салем.** Определение коэффициента погонного затухания ультразвуковой волны в неоднородном материале посредством обработки реализаций структурного шума // Вестник МЭИ. 2017. № 4. С. 146—155.

7. **Качанов В.К., Соколов И.В., Концов Р.В., Синицын А.А., Федоров М.Б.** Адаптивная аппаратура ультразвукового неразрушающего контроля крупногабаритных сложноструктурных объектов // Дефектоскопия. 2016. № 5. С. 3—13.

3. GOST 17624—87. Ul'trazvukovoy Metod Opredeleniya Prochnosti Betona. (in Russian).

4. **Voronkova L.V.** Opredelenie Prochnosti Chuguna Ul'trazvukovym Metodom. Kontrol'. Diagnostika. 2011;12:62—64. (in Russian).

5. **Kartashev V.G.** Izmerenie Koeffitsienta Oslableniya Ul'trazvuka v Materiale s Neodnorodnoy Strukturnoy Pri Odnostoronnem Dostupe. Vestnik MPEI. 2013;4:110—114. (in Russian).

6. **Kartashev V.G., Fadin A.S., Trunov E.I., Ali Zayd Salekh Salem.** Opredelenie Koeffitsienta Pogonnogo Zatushaniya Ul'trazvukovoy Volny v Neodnorodnom Materiale Posredstvom Obrabotki Realizatsiy Strukturnogo Shuma. Vestnik MPEI. 2017;4:146—155. (in Russian).

7. **Kachanov V.K., Sokolov I.V., Kontsov R.V., Sinitsyn A.A., Fedorov M.B.** Adaptivnaya Apparatura Ul'trazvukovogo Nerazrushayushchego Kontrolya Krupnogabaritnyh Slozhnostrukturnyh Ob'ektov. Defekoskopiya. 2016;5:3—13. (in Russian).

Сведения об авторах:

Карташев Владимир Герасимович — доктор технических наук, профессор кафедры основ радиотехники НИУ «МЭИ», e-mail: kartashevvg@mail.ru

Трунов Эдуард Игоревич — аспирант кафедры основ радиотехники, НИУ «МЭИ», e-mail: ediktrunov@mail.ru

Information about authors:

Kartashev Vladimir G. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Fundamentals of Radio Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: kartashevvg@mail.ru

Trunov Eduard I. — Ph.D.-student of Fundamentals of Radio Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: ediktrunov@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 27.04.2018

The article received to the editor: 27.04.2018