

УДК 620.179.1.001.57

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-145-151

## Моделирование структурного шума в ультразвуковой дефектоскопии с учетом частотно-зависимого затухания ультразвука

В.Г. Карташев, Э.И. Трунов, Е.В. Шалимова

Рассмотрен новый метод математического моделирования структурного шума, возникающего при ультразвуковом контроле материалов с неоднородной структурой. Структурный шум представляет собой нестационарный случайный процесс, своеобразие которого состоит в том, что с течением времени меняется не только дисперсия, но и энергетический спектр структурного шума. Нестационарность энергетического спектра структурного шума вызвана частотно-зависимым затуханием ультразвуковых волн в среде, из-за которого высокочастотные составляющие спектра сигнала ослабляются сильнее, чем низкочастотные. В результате энергетический спектр структурного шума с течением времени сужается и смещается в сторону низких частот.

Новизна предлагаемого метода моделирования структурного шума состоит в том, что впервые учитывается частотно-зависимое затухание ультразвуковых волн в зондируемом материале. Структурный шум формируется в результате суперпозиции сигналов, отраженных от неоднородностей, расположенных в объеме материала по случайному равномерному закону. При этом учитываются характеристики зондирующего сигнала и диаграммы направленности преобразователей. В связи с тем, что каждый из этих элементарных сигналов в процессе распространения в среде проходит разный путь, претерпевает различное затухание и, поэтому, имеет различную форму спектра, моделирование структурного шума проводится в спектральной области. Моделирование сводится к вычислению спектров элементарных сигналов и суммированию этих спектров с учетом необходимых задержек. В результате получается спектр реализации структурного шума и затем с помощью обратного преобразования Фурье определяется реализация структурного шума как функция времени. Приведен пример моделирования структурного шума, возникающего при ультразвуковом зондировании материала с заданной частотной зависимостью коэффициента затухания ультразвуковых волн в среде. Сравнение промоделированной реализации и полученной экспериментально подтверждает адекватность предлагаемого метода моделирования структурного шума. Даны ограничения метода и наиболее перспективные области его применения.

*Ключевые слова:* ультразвуковая дефектоскопия, структурный шум, математическое моделирование, частотно-зависимое затухание.

*Для цитирования:* Карташев В.Г., Трунов Э.И., Шалимова Е.В. Моделирование структурного шума в ультразвуковой дефектоскопии с учетом частотно-зависимого затухания ультразвука // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 145—151. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-145-151.

## Simulating Structural Noise in Ultrasonic Flaw Detection Taking into Account Frequency-dependent Attenuation of Ultrasound

V.G. Kartashev, E.I. Trunov, E.V. Shalimova

The article considers a new method for mathematically simulating the structural noise produced during ultrasonic examination of materials having a heterogeneous structure. Structural noise is an unsteady random process, the specific feature of which is that both its dispersion and energy spectrum vary with time. Unsteadiness of the structural noise energy spectrum is caused by frequency-dependent attenuation of ultrasonic waves in the medium, due to which high-frequency components of the signal spectrum are attenuated more intensely than its low-frequency components. As a result, as time passes, the structural noise energy spectrum narrows and shifts toward low frequencies.

The novelty of the proposed structural noise simulation method is that the frequency-dependent attenuation of ultrasonic waves excited in the examined material is taken into account for the first time. Structural noise is generated as a result of the superposition of the signals reflected from heterogeneities located in the material according to a random uniform law. The characteristics of the probing signal and the directional patterns

of the transducers are taken into account. Since each of these elementary signals travels over different paths in the course of their propagation in the medium, undergoes different attenuation and, therefore, has its own different shape of the spectrum, the structural noise is simulated in the spectral domain. The simulation boils down to calculating the spectra of elementary signals and summing these spectra with due regard to the necessary delays. As a result, the structural noise realization spectrum is obtained, after which the structural noise realization as a function of time is determined using the inverse Fourier transform. The article presents an example of simulating the structural noise arising in ultrasonic sounding of material with a specified frequency dependence of ultrasonic wave attenuation coefficient in the medium. A comparison between the simulated and experimentally obtained realizations confirms the adequacy of the proposed structural noise simulation method. Limitations of the method and the most promising fields of its application are pointed out.

*Key words:* ultrasonic flaw detection, structural noise, mathematical simulation, frequency dependent attenuation.

*For citation:* Kartashev V.G., Trunov E.I., Shalimova E.V. Simulating Structural Noise in Ultrasonic Flaw Detection Taking into Account Frequency-dependent Attenuation of Ultrasound. MPEI Vestnik. 2018;4:145—151. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-145-151.

## Постановка задачи

При ультразвуковом (УЗ) неразрушающем контроле материалов со сложной неоднородной структурой возникает проблема выделения информационного сигнала, отраженного от дефекта или дна изделия. При этом основной помехой, затрудняющей выделение сигнала, является структурный шум (СШ), возникающий в результате отражения зондирующего сигнала от многочисленных неоднородностей объекта. Структурный шум представляет собой нестационарный случайный процесс с необычными характеристиками [1]. Для выделения сигнала из СШ, определения координат дефектов и другой необходимой информации об исследуемом объекте используются различные алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов [2 — 5]. При отработке и оценке их эффективности целесообразно использовать математическое (имитационное) моделирование. Если оно адекватно описывает исследуемый объект или явление, то может принести большую пользу, заменив сложные и дорогостоящие эксперименты.

При моделировании алгоритмов обработки сигналов в УЗ-дефектоскопии основную трудность представляет моделирование структурного шума. Этому были посвящены работы [6, 7], однако в них совершен-

но не учитывалось частотно-зависимое затухание УЗ-волн в зондируемом материале.

В большинстве материалов с неоднородной структурой, таких, как бетон, чугун, полимерные композиционные материалы, наблюдается сильное затухание УЗ-волн, растущее с увеличением частоты зондирующего сигнала. Для получения хорошей разрешающей способности в УЗ-дефектоскопии используются широкополосные зондирующие сигналы с относительной шириной спектра до 100 %. При прохождении через среду с частотно-зависимым затуханием высокочастотные составляющие спектра сигнала ослабляются сильнее, чем низкочастотные, в результате спектр сигнала сильно искажается (рис. 1). Чем больше затухание УЗ-волны, тем сильнее искажается спектр сигнала.

Сигналы, отраженные от неоднородностей, претерпевают такие же искажения, причем сигналы, отраженные от удаленных неоднородностей, искажаются сильнее, чем отраженные от неоднородностей, расположенных близко к преобразователям. В результате спектр СШ получается очень сложным, что затрудняет его моделирование.

## Анализ процесса формирования структурного шума

Рассмотрим процесс формирования структурного шума более подробно.

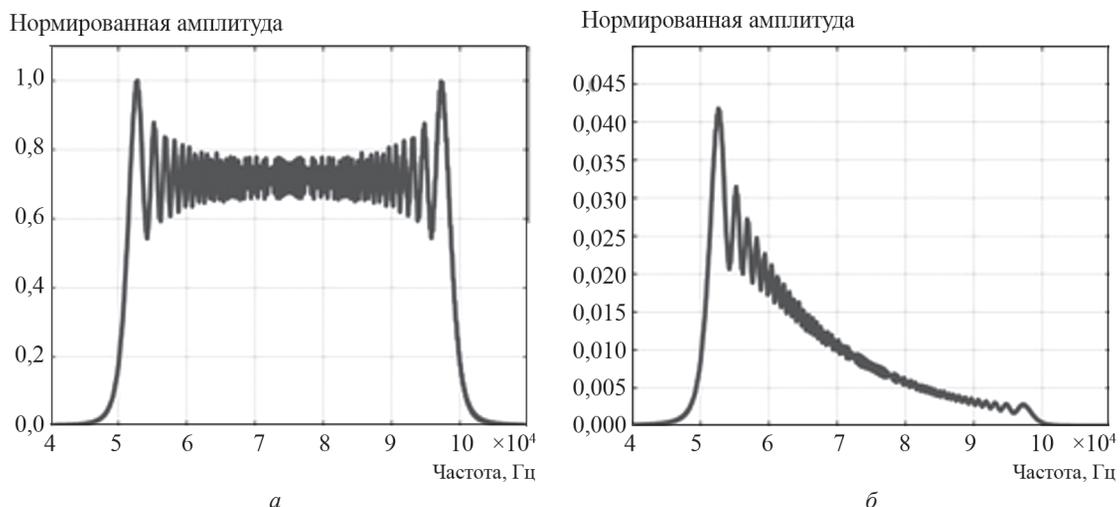


Рис. 1. Спектры зондирующего сигнала (а) и сигнала, отраженного от глубоко расположенных неоднородностей (б)

Неоднородности материала могут иметь различную природу: включения инородного материала, пузырьки воздуха, трещины, скачки плотности материала и т. д. Размеры неоднородностей могут колебаться в широких пределах. Обычно они размещены в объеме материала случайным образом, чаще всего по равномерному закону. Коэффициент отражения от каждой неоднородности зависит от ее размеров, формы, ориентации и частоты зондирующего сигнала. Если размер неоднородности значительно меньше длины волны, то коэффициент отражения по полю пропорционален  $\omega^2$ , а коэффициент отражения по мощности пропорционален  $\omega^4$  (рэлеевское рассеяние). Если крайние частоты спектра различаются в 2 раза (например 50 и 100 кГц), то коэффициенты отражения от неоднородностей на этих частотах различаются на 12 дБ.

При размерах неоднородностей, сравнимых с длиной волны, возникают резонансные эффекты. Зависимость коэффициента отражения от частоты получается очень сложной и практически непредсказуемой.

Еще более сильно на характер спектра СШ влияет частотно-зависимое затухание УЗ-волн в среде. Коэффициент затухания УЗ-волны в большинстве материалов увеличивается с ростом частоты пропорционально  $\omega^n$ , где  $n$  лежит в пределах от 1 до 2. В результате спектр сигнала, отраженного от неоднородностей, сильно искажается, особенно в материалах с сильным затуханием ультразвука. Так, в бетоне затухание УЗ-волн составляет около 100 дБ/м на частоте 100 кГц и около 200 дБ/м на частоте 200 кГц. При зондировании реальных бетонных изделий, толщина которых составляет не меньше нескольких десятков сантиметров, различие затухания на этих частотах составляет десятки децибел. Это существенно ослабляет спектр сигнала на высоких частотах. В качестве примера на рис. 1, а приведен спектр зондирующего сигнала в виде импульса с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-импульса)

с крайними частотами 50 и 100 кГц, а на рис. 1, б — спектр этого же сигнала, отраженного от неоднородностей, расположенных в толще бетона на глубине 30 см. Частотно-зависимое затухание УЗ-волн в среде ведет к сильному перекосу спектра.

Кроме частотно-зависимого затухания на вид реализации СШ влияет ослабление УЗ-волны по закону  $1/r$  в процессе распространения. В результате взаимодействия всех процессов формируется реализация СШ, типичный вид которой приведен на рис. 2. В самом начале интенсивность СШ быстро нарастает из-за того, что в процесс включаются отражения от быстро увеличивающегося числа неоднородностей. Достигается максимум, после чего интенсивность СШ постепенно убывает из-за затухания ультразвука в среде и ослабления по закону  $1/r$  из-за расходимости УЗ-волны.

Таким образом, структурный шум представляет собой нестационарный случайный процесс со сложным характером нестационарности: с течением времени меняется не только дисперсия СШ, но и вид его спектра.

### Проблемы моделирования структурного шума

Математическая модель СШ должна как можно точнее соответствовать реальному структурному шуму. Она должна воспроизводить (имитировать) процесс формирования СШ, т.е. процесс отражения зондирующего сигнала от неоднородностей объекта. Поскольку существует множество неоднородных материалов с различными свойствами, то создание универсальной модели СШ, пригодной для всех материалов и объектов, невозможно. Следовательно, при разработке модели нужно сначала определить ограничения, которые накладываются на параметры модели и области применения.

В работах [6, 7] при моделировании СШ предполагалось, что сигналы, отраженные от неоднородностей,

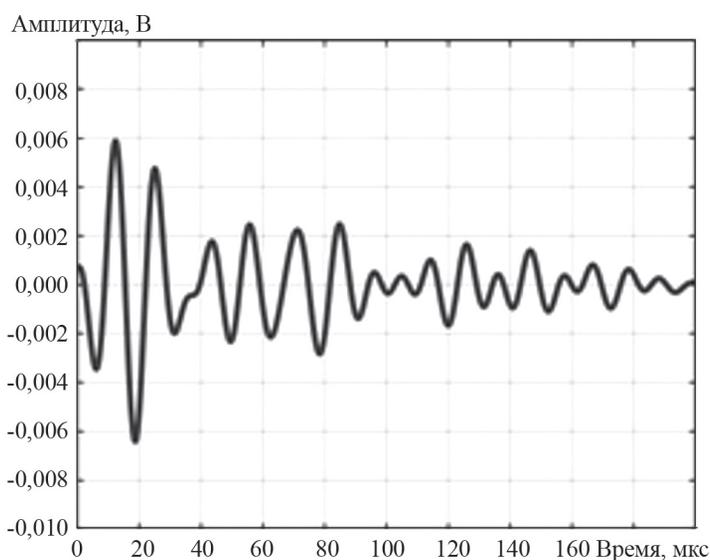


Рис. 2. Реализация СШ, полученная при зондировании бетонного блока

имеют такой же спектр и такую же форму, как и зондирующий сигнал. В действительности при отражении от неоднородности спектр сигнала искажается, причем характер искажений зависит от размера неоднородностей, их формы и ориентации.

Если размеры неоднородностей меньше  $\lambda/10$  ( $\lambda$  — длина УЗ-волны), то наблюдается рэлеевское рассеивание и коэффициент отражения пропорционален квадрату частоты сигнала. Это сравнительно простой случай для математического моделирования СШ. Необходимо учитывать, что размеры неоднородностей и, соответственно, коэффициент отражения от них являются случайными величинами. Закон распределения коэффициентов отражения в зависимости от структуры материала может быть нормальным, рэлеевским или каким-нибудь другим, что учитывается при составлении математической модели СШ.

При увеличении размеров неоднородности больше  $\lambda/10$  характер зависимости коэффициента отражения от частоты постепенно меняется, стремясь к линейному, а при приближении к половине длины волны наступает резонансная область, где предсказать поведение коэффициента отражения практически невозможно. В этой ситуации наиболее простой, хотя и не вполне адекватный, выход из положения заключается в следующем. Учитывая, что размеры неоднородностей разные и их резонансные частоты различаются, то можно приближенно считать, что коэффициент отражения в среднем не зависит от частоты.

Еще одна проблема связана с учетом частотно-зависимого затухания УЗ-волн в среде. Сложность моделирования СШ в этом случае состоит в том, что сигналы, отраженные от неоднородностей, расположенных на разной глубине, искажаются в разной степени, имеют разный спектр и форму. Следовательно, при моделировании реализация СШ должна формироваться в результате суперпозиции сигналов разной формы, что сильно усложняет процесс моделирования. Для решения данной проблемы предлагается следующий путь. Поскольку спектр каждого элементарного сигнала рассчитать несложно, моделирование СШ целесообразно проводить в спектральной области.

### Методика моделирования структурного шума

Математическая модель должна имитировать процесс формирования структурного шума, поэтому при построении математической модели СШ поступим следующим образом. Представим зондируемый объект в виде прямоугольного параллелепипеда, в котором по случайному равномерному закону размещены  $N$  неоднородностей. Размеры параллелепипеда выбираются таким образом, чтобы сигналы, отраженные от самых удаленных неоднородностей, были пренебрежимо малы. Координаты  $i$ -й неоднородности  $(x_i, y_i, z_i)$  задаются с помощью генератора случайных чисел и образуют трехмерный массив случайных чисел.

Для определения характеристик СШ необходимо задать координаты излучающего (ИП) и приемного (ПП) преобразователей. Начало координат можно расположить в любом месте. Для определенности поместим его в центре между ИП и ПП. Координатные оси ориентируем так, как показано на рис. 3. Ось  $x$  направим вдоль линии, соединяющей ИП и ПП, ось  $y$  — перпендикулярно плоскости рисунка. Плоскость  $xOy$ , на которой расположены преобразователи ИП и ПП, соответствует внешней границе объекта, с которой проводится зондирование. Ось  $z$  направлена вглубь объекта.

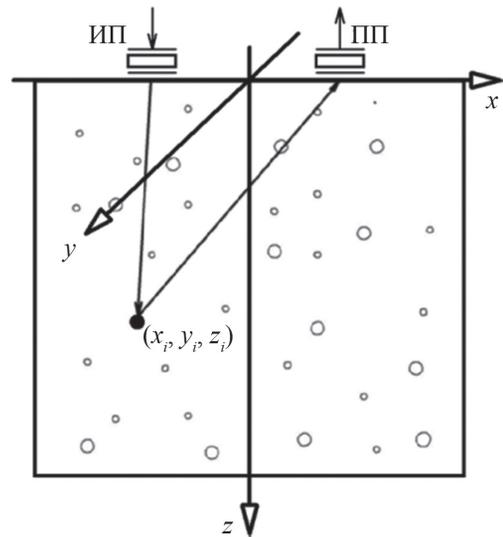


Рис. 3. Схема построения модели СШ

Координаты ИП обозначим, как  $(x_1, 0, 0)$ , координаты ПП —  $(x_2, 0, 0)$ , диаграммы направленности (ДН) ИП и ПП —  $F_1(\varphi, \theta)$ ,  $F_2(\varphi, \theta)$ , где угол  $\theta$  отсчитывается от оси, параллельной оси  $z$ , а угол  $\varphi$  — азимутальный, отсчитываемый от оси  $x$ .

Поскольку ДН — характеристика излучателя в дальней зоне, предполагается, что основная часть неоднородностей находится в дальней зоне преобразователей. Расстояние от ИП до  $i$ -й неоднородности обозначим  $r_{1i}$ , расстояние от  $i$ -й неоднородности до ПП —  $r_{2i}$ :

$$r_{1i} = \sqrt{(x_i - x_1)^2 + y_i^2 + z_i^2};$$

$$r_{2i} = \sqrt{(x_i - x_2)^2 + y_i^2 + z_i^2}.$$

Коэффициент отражения от  $i$ -й неоднородности обозначим  $\rho_i$ .

Ослабление излученного сигнала на пути от ИП до  $i$ -й неоднородности, вследствие сферической расходимости УЗ-волны, пропорционально  $1/r_{1i}$ ; на пути от неоднородности до ПП —  $1/r_{2i}$ . Кроме того, сигнал затухает из-за наличия частотно-зависимого затухания в среде пропорционально  $e^{-\alpha r_i}$ , где  $\alpha$  — коэффициент погонного затухания УЗ-волны, зависящий от частоты;  $r_i = r_{1i} + r_{2i}$  — полный путь, который проходит УЗ-волна. Как уже упоминалось, у сложноструктурных материа-

лов в большинстве случаев коэффициент затухания УЗ-волн увеличивается с ростом частоты по закону  $\omega^n$ , где  $n$  лежит в пределах от 1 до 2. Представим коэффициент затухания УЗ-волны в виде:

$$\alpha = \alpha_0 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^n,$$

где  $\omega_0$  — некоторая частота, входящая в состав спектра зондирующего сигнала (в качестве  $\omega_0$  удобно принимать среднюю частоту спектра зондирующего сигнала);  $\alpha_0$  — коэффициент затухания на частоте  $\omega_0$ .

На уровень принимаемого сигнала также влияют диаграммы направленности обоих преобразователей  $F_1(\varphi_{i1}, \theta_{i1}), F_2(\varphi_{i2}, \theta_{i2})$ .

Запишем формулу для спектра составляющей СШ, возникающей в результате отражения сигнала от  $i$ -й неоднородности, как

$$S_i(\omega) = A \rho_i S_f(\omega) e^{-j\omega t_i} F_1(\varphi_{i1}, \theta_{i1}) \times F_2(\varphi_{i2}, \theta_{i2}) \frac{1}{r_{i1}} \frac{1}{r_{i2}} e^{-\alpha_0 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^n r_i}. \quad (1)$$

Здесь  $A$  — общий амплитудный коэффициент;  $S_f(\omega)$  — спектр зондирующего сигнала;  $t_i = r_i/C$  — запаздывание сигнала, отраженного от  $i$ -й неоднородности, где  $C$  — скорость УЗ-волны в среде.

Для расчета по (1) следует найти выражения для диаграмм направленности преобразователей  $F_1(\varphi_{i1}, \theta_{i1}), F_2(\varphi_{i2}, \theta_{i2})$ . Для этого надо выразить значения углов  $\varphi_{i1}, \varphi_{i2}, \theta_{i1}, \theta_{i2}$  через координаты неоднородностей  $(x_i, y_i, z_i)$ . В результате несложных геометрических построений получим, что

$$\theta_{1i} = \arcsin \left( \frac{z_i}{r_{1i}} \right); \quad \theta_{2i} = \arcsin \left( \frac{z_i}{r_{2i}} \right);$$

$$\varphi_{1i} = \arctg \left( \frac{y_i}{x_i - x_1} \right); \quad \varphi_{2i} = \arctg \left( \frac{y_i}{x_i - x_2} \right).$$

Наиболее просто ДН преобразователей вычисляются для малоапертурных преобразователей продольных волн, диаграмма направленности которых аппроксимируется выражением  $F(\theta) = \cos(\theta)$ , в этом случае  $F_1(\varphi_{i1}, \theta_{i1}) = z_i/r_{1i}, F_2(\varphi_{i2}, \theta_{i2}) = z_i/r_{2i}$ .

Для преобразователей продольных волн с круглой апертурой диаметром более  $\lambda/2$  ДН, согласно [8], описывается выражением

$$F(\theta) = \Lambda_1 \left( \frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta \right) \cos \theta,$$

где  $\Lambda_1 = (2J_1(x))/x$  — лямбда функция;  $J_1(x)$  — функция Бесселя 1-го порядка;  $D$  — диаметр апертуры преобразователя.

Таким образом, может быть вычислена спектральная плотность каждой составляющей СШ. Спектральная

плотность полной реализации СШ выглядит как сумма спектральных плотностей всех составляющих

$$S_{\text{СШ}}(\omega) = A S_f(\omega) \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-j\omega t_i} F_1(\varphi_{i1}, \theta_{i1}) \times F_2(\varphi_{i2}, \theta_{i2}) \frac{1}{r_{i1}} \frac{1}{r_{i2}} e^{-\alpha_0 t_i C \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^n}. \quad (2)$$

Проведя вычисления с помощью формулы (2), найдем комплексную спектральную плотность конкретной реализации СШ. Применяв к ней обратное преобразование Фурье, получим реализацию СШ как функцию времени.

При УЗ-контроле материалов со сложной структурой часто применяются сложномодулированные сигналы с большой базой, длительность которых значительно превышает время прохождения сигнала до неоднородности и обратно. В результате реализация СШ получается очень длинной. В таких случаях при обработке сложно-модулированных сигналов используется согласованная фильтрация, в результате которой длительность сигнала сокращается. Это позволяет получить высокую разрешающую способность и максимальное отношение сигнал/шум. В ходе обработки сигнала процессу согласованной фильтрации подвергается и структурный шум. Поскольку и согласованная фильтрация, и все этапы формирования СШ — операции линейные, их можно менять местами. Это сильно упрощает процедуру моделирования СШ. В этом случае при формировании модели СШ в качестве зондирующего сигнала можно принять сигнал, уже прошедший согласованную фильтрацию. Спектр такого сигнала пропорционален  $S_f(\omega) S_f^*(\omega) = |S_f(\omega)|^2$ , т.е. становится вещественной функцией частоты, что также упрощает расчеты. При моделировании СШ может использоваться формула (2), где вместо  $S_f(\omega)$  нужно подставить  $|S_f(\omega)|^2$ .

### Пример моделирования структурного шума

Для моделирования СШ требуются следующие исходные данные: тип зондирующего сигнала и его параметры, характеристики преобразователей и расстояние между ними, а также параметры среды: коэффициент затухания УЗ-волны и характер зависимости его от частоты (показатель степени  $n$ ), количество неоднородностей в единице объема и закон распределения коэффициента отражения  $\rho_i$ . Кроме того, необходимо задать длину (продолжительность) реализации СШ, которая определяется динамическим диапазоном, т.е. минимальным уровнем сигналов и коэффициентом затухания УЗ-волны.

В качестве примера рассмотрим моделирование СШ, возникающего при зондировании массивного бетонного изделия. Фазовая скорость УЗ-волны равна 4000 м/с. Коэффициент погонного затухания ультразвука в бетоне — 50 дБ/м на частоте 50 кГц. Зависи-

мость коэффициента затухания от частоты — линейная ( $n = 1$ ). В качестве зондирующего сигнала используем ЛЧМ-импульс с изменением частоты от 50 до 100 кГц и базой 250. Принимаемый сигнал подвергнем согласованной фильтрации.

Динамический диапазон СШ примем равным 40 дБ. Это означает, что сигнал, отраженный от самых удаленных неоднородностей, должен ослабляться на 40 дБ. Учитывая, что коэффициент затухания УЗ-волны равен 50 дБ/м, установим, что расстояние до самых удаленных неоднородностей должно быть равно 0,4 м. Определим размеры моделируемого объема  $0,6 \times 0,6 \times 0,4$  м<sup>3</sup>. Общее число неоднородностей, расположенных в этом объеме по случайному равномерному закону, — 100. Коэффициенты отражения от неоднородностей одинаковы и не зависят от частоты. Зондирование проводится с помощью преобразователей продольных акустических волн с круглой апертурой диаметром 40 мм, расстояние между центрами преобразователей — 40 мм.

Результаты моделирования СШ с такими исходными данными представлены на рис. 4. Характер реализации практически такой же, как у полученной экспериментально реализации СШ, приведенной на рис. 2.

#### Области применения метода и его ограничения

При математическом моделировании любых процессов или явлений важно обеспечить адекватность модели и моделируемого объекта. Очевидно, что рассматриваемый метод моделирования СШ пригоден не для всех неоднородных материалов.

Первое ограничение связано с тем, что в нашей модели предполагается, что неоднородности размещены

в объеме материала по случайному равномерному закону. Многие материалы, имеющие слоистую или ячеистую структуру, не удовлетворяют этому требованию.

Второе ограничение связано с тем, что неоднородности должны находиться в дальней зоне преобразователей, где можно использовать понятие диаграммы направленности. Это условие не выполняется при УЗ-зондировании большинства металлов, где размеры неоднородностей меньше миллиметра. При этом рабочая частота обычно составляет несколько мегагерц, а размеры апертуры преобразователей — 10...30 длин волн. В результате большинство неоднородностей оказывается в ближней зоне преобразователей, где нельзя пользоваться понятием диаграммы направленности, и поэтому формулы (1), (2), на которых основан данный метод, применять нельзя.

Рассмотренный метод наиболее пригоден для моделирования СШ в различных разновидностях бетона и сходных с ним материалах с размером неоднородностей 3...30 мм. Для УЗ-контроля используются сигналы с частотой 50...200 кГц, размер апертуры преобразователей не превышает две длины волны и почти все неоднородности находятся в дальней зоне преобразователей.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект №15-19-00096).

#### Литература

1. Качанов В.К. и др. Структурный шум в ультразвуковой дефектоскопии. М.: Издат. дом МЭИ, 2016.
2. Ковалев А.В. и др. Импульсный ЭХО-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.

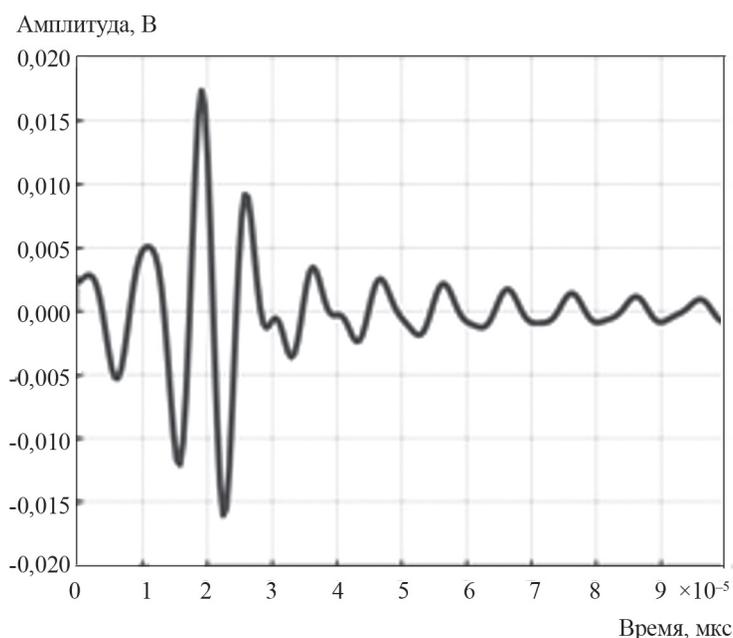


Рис. 4. Оциллограмма СШ, полученная в результате моделирования

3. **Schickert M.** Progress in Ultrasonic SAFT-Imaging of Concrete // Proc. Inter. Symp. Non-Destructive Testing in Civil Eng. Berlin, 2003.

4. **Schickert M., Krause M., Müller W.** Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique // J. Materials in Civil Eng. 2003. V. 15. Pp. 235—246.

5. **Shevaldykin V.G., Kozlov V.N., Samokrutov A.A.** Inspection of Concrete by Ultrasonic Pulse-Echo Tomograph with Dry Contact // Proc. 7<sup>th</sup> European Conf. on Non-Destructive Testing. Copenhagen, 1998.

6. **Севалкин Д.А.** Методы математического моделирования структурного шума в ультразвуковой дефектоскопии // Вестник МЭИ. 2007. № 2. С. 109—116.

7. **Али Зайд Салех Салем, Карташев В.Г., Шалимова Е.В.** Моделирование структурного шума с заданными взаимно корреляционными свойствами // Вестник МЭИ. 2013. № 5. С. 88—92.

8. **Марков Г.Т., Сазонов Д.М.** Антенны. М.: Энергия, 1975.

## References

1. **Kachanov V.K. i dr.** Strukturnyy Shum v Ul'trazvukovoy Defektoskopii. M.: Izdat. Dom MPEI, 2016. (in Russian).

2. **Kovalev A.V. i dr.** Impul'snyy EKHO-metod pri Kontrole Betona. Pomekhi i Prostranstvennaya Seleksiya. Defektoskopiya. 199; 2:29—41. (in Russian).

3. **Schickert M.** Progress in Ultrasonic SAFT-Imaging of Concrete. Proc. Inter. Symp. Non-Destructive Testing in Civil Eng. Berlin, 2003.

4. **Schickert M., Krause M., Müller W.** Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique. J. Materials in Civil Eng. 2003;15:235—246.

5. **Shevaldykin V.G., Kozlov V.N., Samokrutov A.A.** Inspection of Concrete by Ultrasonic Pulse-Echo

Tomograph with Dry Contact. Proc. 7<sup>th</sup> European Conf. on Non-Destructive Testing. Copenhagen, 1998.

6. **Sevalkin D.A.** Metody Matematicheskogo Modelirovaniya Strukturnogo Shuma v Ul'trazvukovoy Defektoskopii. Vestnik MPEI. 2007;2:109—116. (in Russian).

7. **Ali Zayd Salekh Salem, Kartashev V.G., Shalimova E.V.** Modelirovanie Strukturnogo Shuma s Zadannymi Vzaimno Korrelyatsionnymi Svoystvami. Vestnik MPEI. 2013;5:88—92. (in Russian).

8. **Markov G.T., Sazonov D.M.** Antenny. M.: Energiya, 1975. (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

**Шалимова Елена Владимировна** — кандидат технических наук, доцент кафедры основ радиотехники НИУ «МЭИ», e-mail: shalimovayv@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

**Shalimova Elena V.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Fundamentals of Radio Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: shalimovayv@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 11.09.2017*