

**Ефимов Валерий Григорьевич**, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры информационных управляющих систем Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова.  
E-mail: evg@bti.secna.ru

Область научных интересов: радиационные и ультразвуковые технологии, исследования внутрикамерных процессов, вейвлет-анализ.

**Ложкова Юлия Николаевна**, аспирант, инженер кафедры информационных управляющих систем Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова.

E-mail: julianna9@qip.ru

Область научных интересов: вейвлет-анализ, ультразвуковая и СВЧ толщинометрия.

**Учайкина Елена Сергеевна**, аспирант, инженер международной научно-образовательной лаборатории радиационного контроля и диагностики кафедры физических методов и приборов контроля качества Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: uchaikina2@mail.ru  
Область научных интересов: обработка изображений, вычислительная диагностика, квантовые компьютеры, программирование.

**Кулешов Валерий Константинович**, д-р техн. наук, профессор кафедры физических методов и приборов контроля качества Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: mail@introscopy.tpu.ru  
Область научных интересов: исследование высокочувствительных детекторов излучения и разработка приборов на их основе, вычислительная диагностика.

УДК 681.5(045)

## ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОХОЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ЧЕРЕЗ ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМУЮ СРЕДУ

В.Г. Ефимов\*, Ю.Н. Ложкова\*, Е.С. Учайкина,  
В.К. Кулешов

\*Бийский технологический институт, г. Бийск  
Томский политехнический университет  
E-mail: evg@bti.secna.ru

Описана информационная модель прохождения ультразвука через частотно-зависимую среду, которая позволяет на основе решения обратной задачи формировать зондирующие импульсы, обеспечивающие минимальную погрешность выделения информативного признака эхо-сигнала при использовании вейвлетной технологии. Исследования направлены на учет искажений формы зондирующего импульса.

### Ключевые слова:

Ультразвуковой сигнал, вейвлет-преобразование, скорость горения.

Основным акустическим методом исследования скорости горения в настоящее время является ультразвуковой эхо-метод, который типичен для классической техники толщинометрии. Ультразвуковой преобразователь излучает упругую волну, которая проходит через энергетическую установку (ЭУ), отражается от горящей поверхности и возвращается назад к преобразователю. Отслеживая смещение отраженного сигнала по сравнению с начальным положением, можно определить величину сгоревшего свода, а потом и скорость горения. Время распространения ультразвуковой (УЗ) волны связано с толщиной материала и скоростью распространения волны. Если скорость волны  $c$  постоянна, то толщина материала  $L$  пропорциональна времени прохождения  $\tau$ .

При отработке метода решались две основные задачи. Первая задача связана с созданием комплекса технических средств, обеспечивающих зондирование ЭУ и регистрацию отраженных сигналов [1]. Выбор технических характеристик элементов комплекса проведен на основании результатов моделирования распространения ультразвука в топливном элементе как частотно-зависимой среде.

Второй, наиболее сложной задачей, связанной с реализацией метода, является создание программного комплекса, обеспечивающего автоматизированную обработку результатов регистрации. Многофакторность процессов, сопровождающих огневые испытания и вли-

яющих на выходной сигнал, широкий спектр условий проведения УЗ зондирования позволяет лишь приблизительно прогнозировать эффективный диапазон работоспособности технических средств и алгоритмы последующей обработки, в частности, связанные с применением теории вейвлет-преобразования (ВП) [2].

В основе решения этой задачи лежит необходимость точной временной локализации координаты информативного участка эхо-сигнала. Для повышения информативности результатов исследований необходимо знать, как изменяется форма и спектр ультразвукового сигнала в процессе его распространения в объекте. Поскольку импульсные сигналы не являются, строго говоря, монохроматическими, то при измерениях всегда возникают погрешности, определяемые формой применяемых импульсов и параметрами исследуемой среды. Учет подобного вида погрешностей представляет принципиальный интерес для выбора параметров контроля и разработки методики определения скорости горения.

Если коэффициент затухания ультразвука в исследуемой среде зависит от частоты, то при распространении акустического импульса его отдельные составляющие ослабляются в различной степени, что в свою очередь приводит к искажению формы импульса.

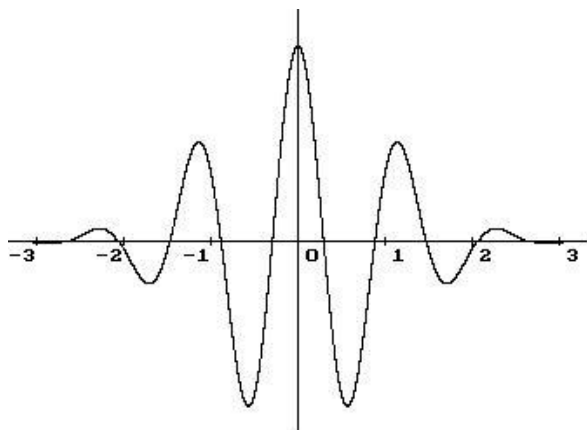
Исследованию зависимости затухания ультразвука посвящен ряд работ, в частности [3], где анализировалось прохождение высокочастотного УЗ импульса колоколообразной формы через среды с различными зависимостями затухания от частоты. В общем случае математическое решение задачи отыскания формы импульса, прошедшего через среду с частотно-зависимым затуханием, чрезвычайно затруднительно. К сожалению, отсутствуют работы по исследованию влияния частотных искажений в среде на характеристики обнаружения сигнала и точность их параметров. Между тем, этот вопрос чрезвычайно важен для правильного расчета и проектирования систем эхо-толщинометрии.

Проведем сначала теоретические исследования искажений сигнала при его распространении в среде с частотно-зависимым затуханием, с частичным использованием методологии [4].

Для теоретического анализа искажений необходимо задать вид эхо-сигнала. Обычно для повышения точности измерений контроль ведется по первой или второй полуволне. Однако при проведении теоретического анализа представление сигнала в виде одного или двух полупериодов синуса не позволяет получить аналитические выражения для эхо-сигнала в процессе его распространения в среде с частотно-зависимым затуханием. В связи с этим был использован сигнал в форме плоской волны, модулированной гауссианом:

$$U(t) = \exp \left[ - \left( \frac{\Omega}{\omega_0} \right)^2 \frac{t^2}{2} + i\Omega t \right], \quad (1)$$

где  $\Omega = 2\pi f_{изл}$  – несущая частота излучения;  $\omega_0$  – безразмерный параметр разложения, имеющий смысл характерной частоты;  $i$  – мнимая единица. Амплитуда сигнала для простоты выбрана равной единице. По существу выражение (1) описывает приведенный к реальному масштабу времени вейвлет Morlet, действительная часть которого показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Форма вейвлета Morlet

Представим среду в виде четырехполосника с коэффициентом затухания  $K_{cp}(i\omega)$ :

$$K_{cp}(\omega) = \exp \left[ -\frac{\gamma l \omega^2}{4\pi^2} + i\pi \right],$$

где  $\gamma$  – удельный коэффициент поглощения ультразвука в среде;  $l$  – расстояние, пройденное ультразвуковым импульсом в среде;  $\omega$  – круговая частота.

Спектр исходного сигнала  $U(t)$  (1) имеет вид:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(t) \exp(-j\omega t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[ -\left( \frac{\Omega}{\omega_0} \right)^2 \frac{t^2}{2} + j\Omega t - j\omega t \right] dt = \frac{\omega_0 \sqrt{2\pi}}{\Omega} \exp \left[ -\frac{(\Omega - \omega)^2 \omega_0^2}{2\Omega^2} \right]. \quad (2)$$

Спектр сигнала на выходе четырехполосника определяется следующим образом:

$$S_1(\omega) = K_{cp}(j\omega) S(\omega) = \frac{\omega_0 \sqrt{2\pi}}{\Omega} \exp \left( \pi j - \frac{\omega_0^2}{2} \right) \exp \left[ \frac{-\omega^2 (2\pi^2 \omega_0^2 + \gamma l \Omega^2)}{4\pi^2 \Omega^2} + \frac{\omega \omega_0^2}{\Omega} \right]. \quad (3)$$

Применив обратное преобразование Фурье получим вид сигнала, прошедшего среду с частотно-зависимым затуханием:

$$U_1(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_1(\omega) \exp(j\omega t) d\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2\alpha l}{\omega_0^2}}} \exp \left( \pi j - \frac{\alpha l}{1 + \frac{2\alpha l}{\omega_0^2}} \right) \exp \left[ \frac{-\left( \frac{\Omega}{\omega_0} \right)^2 \frac{t^2}{2} + j\omega t}{1 + \frac{2\alpha l}{\omega_0^2}} \right], \quad (4)$$

где  $\alpha = \frac{\gamma \Omega^2}{4\pi^2}$ .

Исследуем изменение формы сигнала (1) в процессе его распространения в наполнителе. Из сравнения выражений (1) и (4) следует, что максимум огибающих обоих сигналов достигается при  $t_{max} = 0$ . При этом амплитуда максимума выходного сигнала меньше, чем входного в

$$k_u = \frac{U_1(t_{max})}{U(t_{max})} = \sqrt{1 + \frac{2\alpha l}{\omega_0^2}} \exp \left( -\frac{\alpha l}{1 + \frac{2\alpha l}{\omega_0^2}} \right) \text{ раз.}$$

Если принять длительность  $\tau$  исходного сигнала по уровню 0,95 равной  $\pm 2\sigma$ , т. е.  $\sigma^2 = \frac{\omega_0^2}{\Omega^2}$ , то

$\tau = \frac{4\omega_0}{\Omega}$ . Длительность выходного сигнала больше входного в  $k_\tau = \sqrt{1 + \frac{2\alpha l}{\omega_0^2}}$  раз.

Исследуем изменение спектра излучения в процессе его распространения. Максимум выражения (2) достигается при условии:

$$\omega_{max} = \Omega. \quad (5)$$

Определим ширину спектра излученного сигнала  $\Delta\omega$ , которая соответствует полосе частот, на границе которой амплитуда огибающей спектра меньше в  $e$  раз своего максимального значения, т. е.

$$\frac{S(\omega)}{S(\omega_{max})} = \frac{1}{e}.$$

Отсюда находим:

$$\Delta\omega = \pm \frac{\Omega}{\sqrt{\frac{\omega_0^2}{2}}}. \quad (6)$$

Максимум выражения (4) достигается при:

$$\omega_{Lmax} = \frac{\Omega}{1 + \frac{2\alpha l}{\omega_0^2}}. \quad (7)$$

Найдем ширину спектра сигнала, прошедшего через наполнитель  $\Delta\omega_1$ , так же как находили ширину спектра излученного сигнала

$$\Delta\omega_1 = \pm \frac{\Omega}{\sqrt{\frac{\omega_0^2}{2}} \sqrt{1 + \frac{2\alpha l}{\omega_0^2}}}. \quad (8)$$

Сравнивая выражения (6) и (8) видно, что ширина спектра сигнала в процессе его распространения в частотно-зависимой среде уменьшается в  $k_\omega = \sqrt{1 + \frac{2\alpha l}{\omega_0^2}}$  раз, что совпадает со значением  $k_\tau$ . Из выражений (5) и (7) следует, что частота максимума огибающей спектра сигнала, прошедшего через наполнитель, смещается в область низких частот в  $k_f = 1 + \frac{2\alpha l}{\omega_0^2}$  раз.

Расчетные значения коэффициентов  $k_u, k_\tau, k_\omega, k_f$  в зависимости от расстояния  $l$  при  $f_{изл} = 50 \text{ кГц}, \alpha = 13,7 \frac{1}{\text{м}}, \omega_0 = 6$  приведены в табл. 1. Значения коэффициента затухания  $\alpha$  определены экспериментально.

**Таблица 1.** Результаты расчетов

| $l, \text{м}$       | 0,1   | 0,2   | 0,5  | 0,75  | 1,0   | 1,5   |
|---------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| $k_u$               | 3,84  | 11,5  | 167  | 871   | 3173  | 21472 |
| $k_\tau = k_\omega$ | 1,037 | 1,073 | 1,17 | 1,253 | 1,327 | 1,463 |
| $k_f$               | 1,076 | 1,152 | 1,38 | 1,57  | 1,76  | 2,14  |

Полученные результаты предоставляют пользователю возможность оптимальным образом планировать методику контроля и проводить корректный анализ измерительной информации. Дальнейшие исследования направлены на учет искажений формы зондирующего импульса, что представляет принципиальный интерес для метрологической аттестации методик измерения текущей толщины свода, скорости горения, газоприхода [5].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов В.Г., Дерябин Ю.А., Митин А.Г. Экспериментальное использование ультразвукового метода для определения скорости горения по своду заряда в процессе огневой утилизации РДТТ // Известия Вузов. Сер. Физика. – 2004. – № 10. – С. 64–67.
2. Ефимов В.Г., Гончаров М.Е., Александрович В.М. Сравнение эффективности применения некоторых вейвлет-преобразований в ультразвуковой толщинометрии энергетических установок // Известия Вузов. Сер. Физика. – 2004. – № 10. – С. 68–72.
3. Горбатов А.А., Рудашевский Г.Е. Акустические методы измерения расстояний и управления. – М.: Энергоиздат, 1981. – 280 с.
4. Кондратьев Ю.А., Половинский А.В. Исследование искажений акустического сигнала при его распространении в среде с частотно-зависимым коэффициентом затухания // Труды Научно-исследовательского и конструкторского института испытательных машин, приборов и средств измерения масс (НИКИМП) / Неразрушающий контроль качества изделий. – М.: Москва, 1972. – Вып. 2. – С. 35–38.
5. Ефимов В.Г., Ложкова Ю.Н., Митин А.Г. Ультразвуковая система динамических измерений для исследования твердотопливных энергетических установок // Ползуновский вестник. – 2011. – № 3/1. – С. 184–187.

Поступила 18.11.2011 г.