

## Упругие потери и дисперсия в керамоматричных пьезокомпозитах

© А.Н. Рыбьянец, А.А. Науменко, Г.М. Константинов, Н.А. Швецова, М.А. Луговая

Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета,  
Ростов-на-Дону, Россия

E-mail: arybyanets@gmail.com

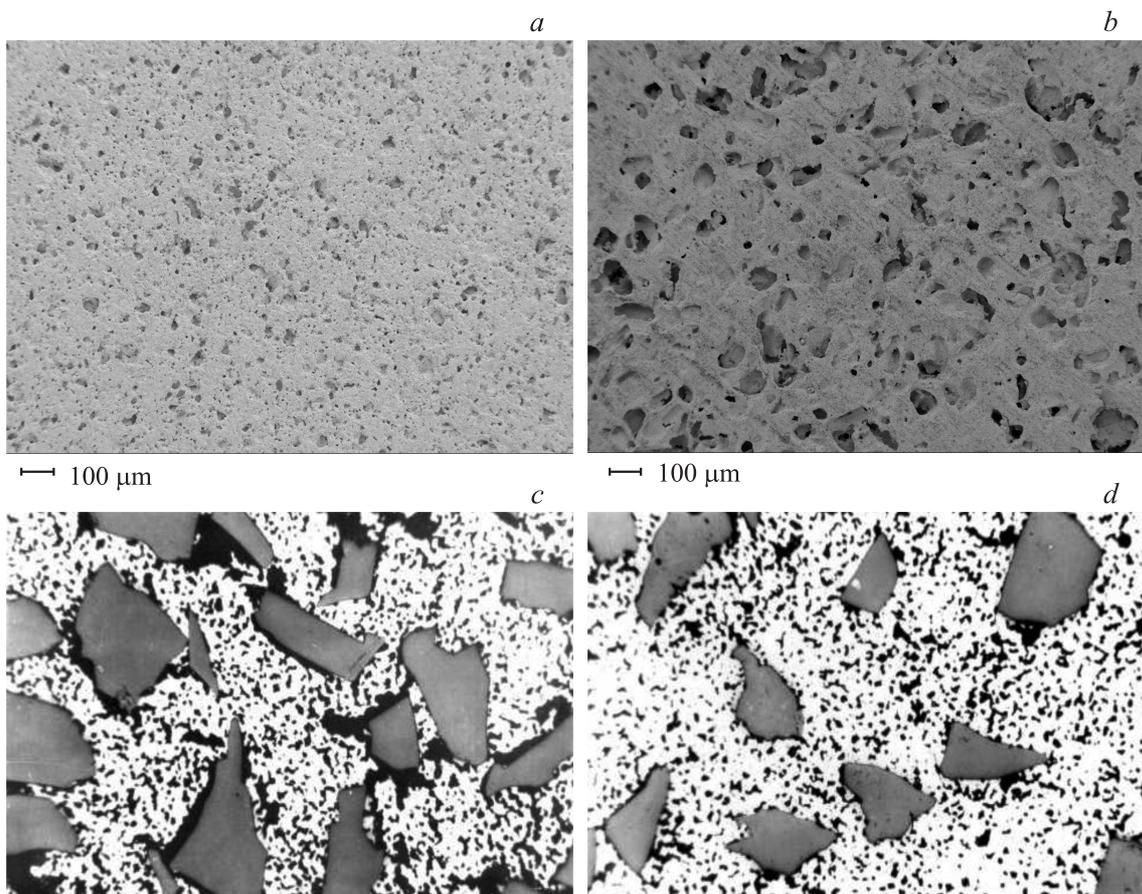
Выполнено комплексное исследование керамоматричных композитов различных типов, включающее компьютерное трехмерное моделирование, резонансный анализ импедансных спектров и эхо-импульсные ультразвуковые измерения. Представлены результаты конечно-разностного моделирования процессов распространения продольных ультразвуковых волн в различных вязкоупругих керамоматричных композитах (пористая керамика и керамика/кристалл). В результате экспериментальных исследований обнаружены области упругой дисперсии, характеризующиеся аномалиями частотных зависимостей мнимых и действительных частей упругих модулей. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными.

### 1. Введение

В последние годы многофазные керамоматричные композиты широко используются в пьезоэлектрических датчиках и ультразвуковых преобразователях [1–4].

Керамические композиты являются сложными объектами для теоретического анализа, неразрушающего контроля и ультразвуковых измерений. Изменения химического состава на границах раздела фаз,

а также появление микропористости при совместном спекании компонентов композита могут влиять на упругие и механические свойства композита. Пространственная дисперсия и рассеяние искажают характеристики ультразвуковых импульсов и могут сделать ультразвуковые измерения неоднозначными. В последнее время были предложены различные методы моделирования и оценки композитных структур [5,6].



**Рис. 1.** Микрофотографии поверхности пористой пьезокерамики ЦТС пористостью 18 (a) и 21% (b) и керамоматричного композита ЦТС/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с объемным содержанием кристаллитов 20 (c) и 10% (d), полученные с помощью оптического сканирующего электронного микроскопа.

## 2. Объекты исследования

В качестве модельных образцов для моделирования распространения ультразвуковых волн и сравнения с результатами анализа импедансных спектров и ультразвуковых измерений были выбраны два типа керамических композитов с сильной пространственной дисперсией и высокими потерями [7,8] (рис. 1).

1. Керамоматричный композиционный материал, состоящий из сегнетомягкой матрицы — цирконата-титаната свинца (ЦТС) — с произвольно распределенными кристаллитами  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  со средним диаметром частиц  $\sim 200\ \mu\text{m}$  и объемным содержанием от 9 до 26 vol.%. (рис. 1, *c, d*).

2. Пористая пьезокерамика ЦТС с различными значениями пористости и размером пор: пористость 18%, размер пор  $30\ \mu\text{m}$  (рис. 1, *a*) и пористость 21%, размер пор  $75\ \mu\text{m}$  (рис. 1, *b*).

## 3. Методы измерений

Комплексные электрофизические параметры пьезокомпозиатов определялись методом импедансной спектроскопии с использованием программы анализа резонансных спектров (PRAP) [9,10]. Это программное обеспечение использует обобщенную форму метода Смита для определения свойств материала для произвольной стандартной резонансной моды [11] и обобщенный метод отношений для радиальной моды, действительный для материалов с произвольной механической добротностью  $Q$  [12]. В результате анализа для каждой нечетной гармоники могут быть определены частотные зависимости комплексных параметров материала. Для подтверждения правильности результатов программное

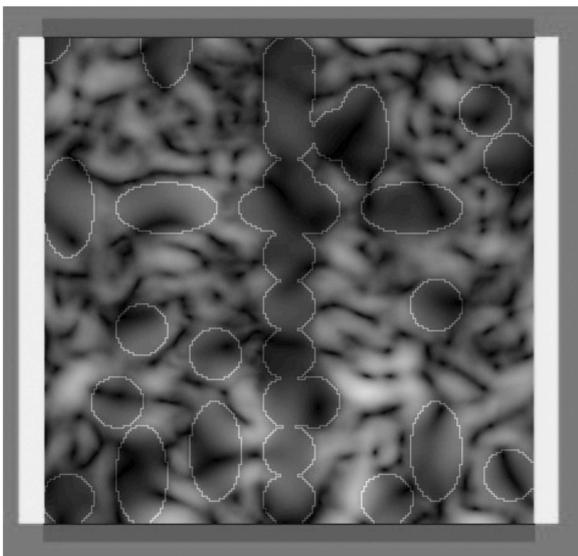


Рис. 2. Модель композита ЦТС/ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , полученная с помощью Wave 3000 Pro.

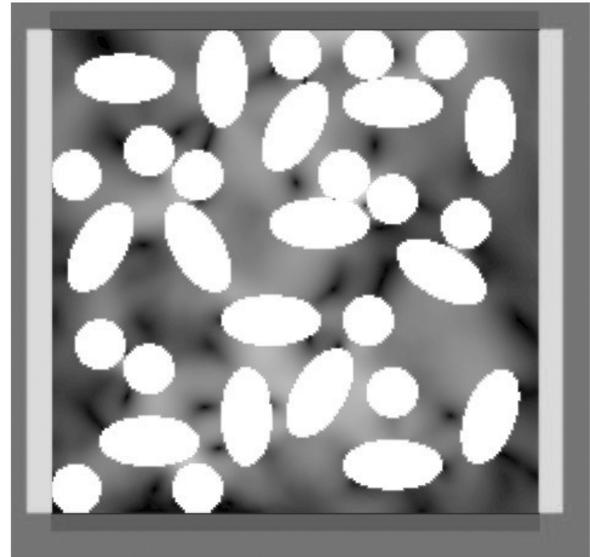


Рис. 3. Модель пористой керамики, полученная с помощью Wave 3000 Pro.

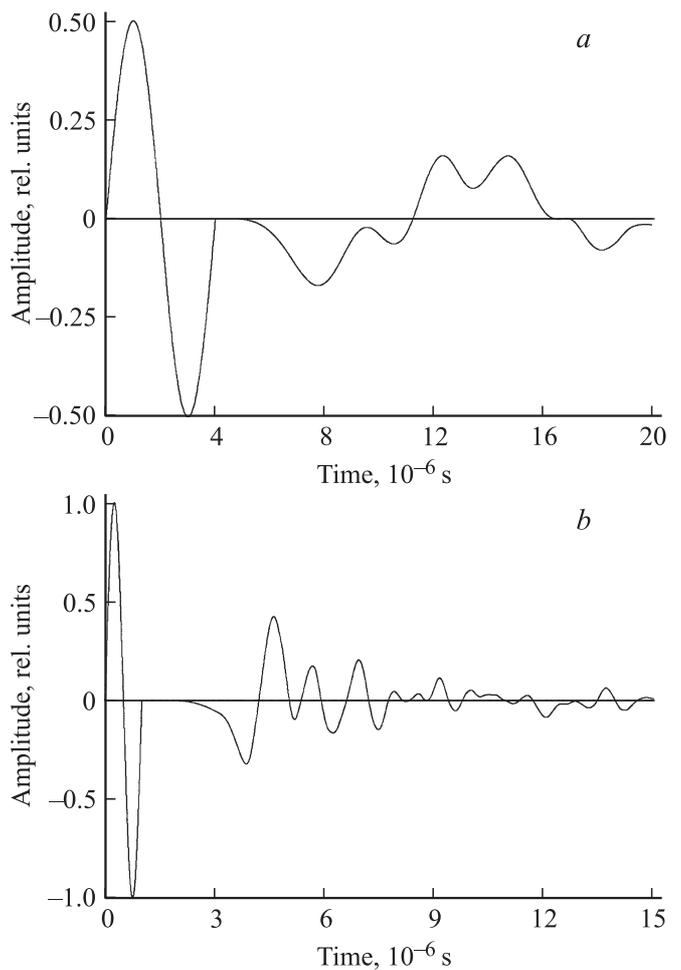
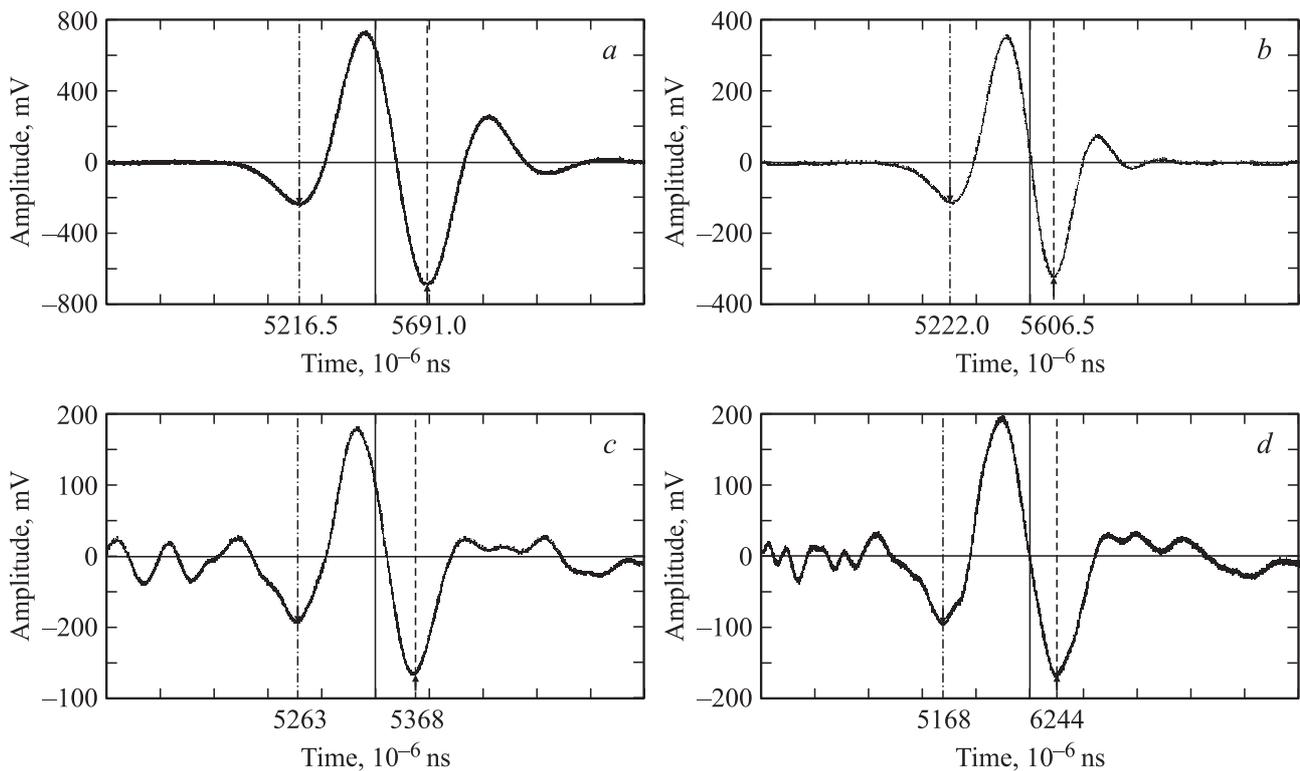


Рис. 4. Теневые импульсные характеристики для композита ЦТС/ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (*a*) и пористой керамики (*b*), полученные с помощью Wave 3000 Pro.



**Рис. 5.** Эхо-импульсные характеристики для пористой керамики (a, b) и композита ЦТС/ $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (c, d). Частота полученных импульсов 2.1 (a), 2.6 (b), 0.9 (c) и 0.93 MHz (d).

обеспечение генерирует спектр импеданса по рассчитанным параметрам. Измерения были проведены на анализаторе импеданса Solartron Impedance/Gain-Phase Analyzer SL 1260. Скорость звука и затухание продольных и поперечных волн в разных направлениях поляризованных и неполяризованных образцов были измерены ультразвуковым эхо-импульсным и теневым методами в диапазоне частот 1–10 MHz с помощью цифрового осциллографа LeCroy Wave Surfer 422, генераторов-приемников Olympus 5800, 5077 с использованием стандартных ультразвуковых преобразователей Olympus.

#### 4. Алгоритм моделирования

Для моделирования композитных структур был использован конечно-разностный пакет Wave 3000 Pro [13]. Эта программа кроме нахождения полного пространственного и временного решения акустической задачи позволяет моделировать ультразвуковые измерения для различных конфигураций излучателя и приемника. Трехмерные композитные объекты для моделирования генерировались как с использованием встроенной процедуры „Геометрия“ пакета Wave3000 Pro, так и с помощью микрофотографий последовательных срезов реальных композитных элементов, полученных в оптическом и сканирующем электронном микроскопах.

Пакет Wave 3000 Pro позволяет находить численные решения трехмерного вязкоупругого волнового урав-

нения. Численное решение основывается на конечно-разностном алгоритме [14]. Алгоритм адаптирован для учета вязких потерь. Волновое уравнение для изотропной упругой области, моделируемое пакетом Wave3000 Pro, имеет вид

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \left[ \mu + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right] \Delta^2 w + \left[ \lambda + \mu + \phi \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\eta}{3} \frac{\partial}{\partial t} \right] \Delta(\Delta w).$$

В этом уравнении использованы стандартные обозначения переменных [13].

На рис. 2–4 представлены примеры моделей композита и пористой керамики и соответствующие теневые импульсные характеристики, полученные в результате моделирования с помощью программы Wave 3000 Pro.

#### 5. Экспериментальные результаты и обсуждение

5.1. Ультразвуковые измерения. На рис. 5 представлены эхо-импульсные характеристики для пористой керамики и композитных элементов (диаметр 25 mm, толщина 8 mm), измеренные на частотах 2.25 и 5 MHz.

Как видно из рис. 5, эхо-импульсы сильно искажены, а их эффективные частоты существенно снижены, что вызвано рассеянием ультразвуковых волн и пространственной дисперсией. Это делает эхо-импульсные измерения

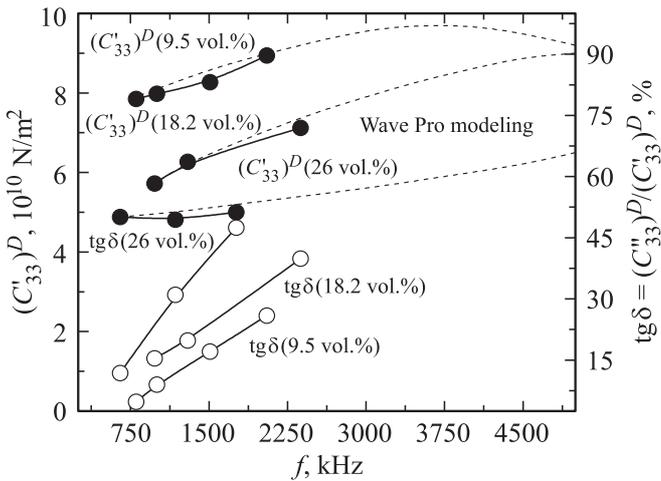


Рис. 6. Измеренные и рассчитанные частотные зависимости модулей упругости  $(C'_{33})^D$  и соответствующих упругих потерь  $tg\delta = (C''_{33})^D / (C'_{33})^D$  для композитов ЦТС/ $\alpha$ - $Al_2O_3$ .

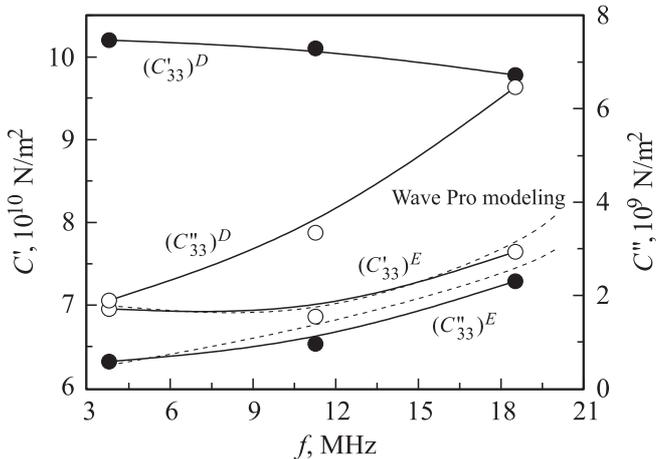


Рис. 7. Измеренные и рассчитанные частотные зависимости действительной  $(C'_{33})^D$ ,  $(C'_{33})^E$  и мнимой  $(C''_{33})^D$ ,  $(C''_{33})^E$  частей модулей упругости для пористой пьезокерамики ( $D$  — электрическая индукция,  $E$  — электрическое поле).

частотных зависимостей упругих свойств керамических композитов неточными и неоднозначными.

5.2. Результаты измерения импедансных спектров и моделирования Wave 3000 Pro. На рис. 6 представлены частотные зависимости действительных частей модулей упругости  $(C'_{33})^D$  и соответствующих им упругих потерь  $tg\delta = (C''_{33})^D / (C'_{33})^D$  для керамических композитов ЦТС/ $\alpha$ - $Al_2O_3$  с различным объемным содержанием  $\alpha$ - $Al_2O_3$ , измеренные на стандартных образцах в форме дисков с помощью анализа резонансных спектров (PRAP) и моделирования в оболочке Wave 3000 Pro. Легко видеть, что модуль упругости  $(C'_{33})^D$  увеличивается с ростом частоты из-за частотной дисперсии, вызванной рассеянием ультразвуковых волн. Видно, что частотные зависимости потерь из-за рассеяния  $tg\delta$  являются линейными, что

соответствует стохастическому типу рассеяния  $tg\delta \sim df$  при  $\lambda \sim d$ , где  $d$  — диаметр рассеивающей частицы,  $f$  — частота,  $\lambda$  — длина волны. Уменьшение наклона зависимости  $(C'_{33})^D$  от частоты при росте концентрации  $\alpha$ - $Al_2O_3$  вызвано уменьшением пространственного масштаба неоднородностей и сдвигом максимумов дисперсии в высокочастотную область.

На рис. 7 представлены частотные зависимости действительной и мнимой частей модулей упругости  $C'_{33}$  и  $C''_{33}$  для пористой пьезокерамики, измеренные на первой, третьей и пятой гармониках для стандартных пьезокерамических дисков с использованием метода анализа резонансных спектров (PRAP) и моделирования с помощью программы Wave 3000 Pro. Нетрудно заметить, что  $(C'_{33})^E$  (действительная часть), а также  $(C''_{33})^E$  (мнимая часть) возрастают с увеличением частоты, что вызвано рэлеевским рассеянием (дисперсией) высокочастотных ультразвуковых волн на порах. В свою очередь  $(C'_{33})^D$  (действительная часть) падает, а  $(C''_{33})^D$  существенно возрастает с частотой в результате изменения электро-механического вклада в  $C'_{33}$  (значение коэффициента электромеханической связи  $k_t$  при измерениях на высших гармониках значительно уменьшается). Из рис. 6 и 7 очевидно, что результаты моделирования с помощью Wave 3000 Pro хорошо согласуются с полученными экспериментально частотными зависимостями упругих модулей.

## 6. Заключение

Представлены результаты комплексного исследования, включающего конечно-разностное трехмерное моделирование, импедансную спектроскопию и эхо-импульсные ультразвуковые измерения различных керамических композитов с сильной пространственной дисперсией и высокими потерями. Показано, что эхо-импульсные измерения зависимостей упругих свойств для керамических композитов с дисперсией и потерями являются неточными и неоднозначными. В свою очередь метод анализа резонансных спектров (PRAP) позволяет получить точные и воспроизводимые результаты, которые хорошо согласуются с результатами трехмерного моделирования, выполненного методом конечных разностей с использованием пакета Wave 3000 Pro.

## Список литературы

- [1] А.Я. Данцигер, О.Н. Разумовская, Л.А. Резниченко, В.П. Сахненко, А.Н. Клевцов, С.И. Дудкина, Л.А. Шилкина, Н.В. Дергунова, А.Н. Рыбьянец. Многокомпонентные системы сегнетоэлектрических сложных оксидов: физика, кристаллохимия, технология. Аспекты дизайна активных материалов. Изд-во Ростов. ун-та, Ростов н/Д (2001) Т. 1. 408 с.
- [2] A.N. Rybyanets. In: Piezoelectrics and related materials: investigations and applications / Ed. I.A. Parinov. Nova Science Publ., Inc., NY (2012) V. 5. P. 143.

- [3] A.N. Rybyanets, A.A. Rybyanets. IEEE Trans. UFFC **58**, 1757 (2011).
  - [4] A.N. Rybyanets. IEEE Trans. UFFC **58**, 1492 (2011).
  - [5] A.N. Rybyanets. In.: Piezoceramic materials and devices / Ed. I.A. Parinov. Nova Science Publ., Inc., NY (2010) V. 3. P. 113.
  - [6] A. Nasedkin, A. Rybjanets, L. Kushkuley, Y. Eshel. Proc. IEEE Ultrason. Symp. Rotterdam (2005) P. 1648.
  - [7] A.N. Rybjanets, A.V. Nasedkin, A.V. Turik. Integr. Ferroelectrics **63**, 179 (2004).
  - [8] A.N. Rybyanets. Ferroelectrics **419**, 90 (2011).
  - [9] PRAP (Piezoelectric Resonance Analysis Program). TASI Technical Software, Inc.; [www.tasitechnical.com](http://www.tasitechnical.com)
  - [10] A.N. Rybyanets, A.A. Naumenko, N.A. Shvetsova. In.: Nano- and piezoelectric technologies, materials and devices / Ed. I.A. Parinov. Ed. Nova Science Publ. Inc., NY (2013). V. 1. P. 275.
  - [11] J.G. Smits. IEEE Trans. Sonics Ultrason. **23**, 6, 393 (1976).
  - [12] C. Alemany, A.M. Gonzalez, L. Pardo, B. Jimenez, F. Carmona, J. Mendiola. J. Phys. D **28**, 5, 945 (1995).
  - [13] Wave 3000 Pro (Software for 3D Ultrasound Simulation). CyberLogic, Inc.; [www.cyberlogic.org](http://www.cyberlogic.org)
  - [14] P.P. Delsanto, R.S. Schechter, R.B. Mignogna. J. Wave Motion **26**, 329 (1997).
-