

Акустическая визуализация объектов в жидкостях с помощью матрицы из стержневых волноводов

С. А. Петросян^{1,*}, С. А. Цысарь^{1,†}, В. Д. Свет², О. А. Сапожников¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Акустический институт имени Н. Н. Андреева. Россия, 117036, Москва, Шверника, д. 4 (Статья поступила 23.01.2020; подписана в печать 24.01.2020)

На данный момент существует несколько акустических методов визуализации для исследования непрозрачных жидкостей с тепловыми неоднородностями, например, агрессивных химически активных жидкостей и расплавленных металлов, где применение электромагнитных волн зачастую затруднено или просто невозможно, а применение акустических преобразователей для приёма ультразвуковой (УЗ) волны сопряжено с рядом практических трудностей. Главной проблемой при этом является защита пьезопреобразователя от воздействия агрессивной среды и относительно низкая чувствительность высокотемпературных приёмных пьезодатчиков, что затрудняет использование традиционных систем ультразвуковой визуализации. В настоящей работе предлагается метод обнаружения и визуализации объектов с использованием сканирующей эхо-импульсной системы, акустические сигналы в которой принимаются через волноводы в виде стальных стержней. Излучение зондирующего импульса в жидкость можно осуществить, используя высокотемпературный пьезоизлучатель, который способен выдержать такие жёсткие условия, либо через стержневой волновод, один конец которого находится в среде с безопасными для работы условиями. На этом конце располагается источник УЗ сигнала. Другой конец погружается в агрессивную жидкость и подводится к участку визуализации для его зондирования. Для регистрации ультразвукового эхо-сигнала, отражённого от объекта исследования, используется многоканальная волноводная система в виде набора металлических стержней, один торец которой находится вблизи объекта визуализации, обеспечивая широкий угол обзора и высокое разрешение. Стержни являются достаточно длинными, так что второй торец приёмной системы находится вне агрессивной жидкости, где уже можно принимать сигналы традиционными методами.

PACS: 43.60.-c, 43.60.+d УДК: 534.6.08

Ключевые слова: акустические волноводы, волноводная матрица, стержни, обработка сигналов

ВВЕДЕНИЕ

Визуализация объектов в оптически непрозрачных или агрессивных жидкостях является сложной задачей, в которой возможно применение ультразвуковых (УЗ) методов. На данный момент существует несколько акустических методов визуализации в таких жидкостях [1, 2, 3]. Главной проблемой при этом является защита пьезопреобразователя от воздействия агрессивной среды, что затрудняет использование традиционных систем УЗ визуализации. В настоящей работе развивается метод обнаружения и визуализации объектов с использованием сканирующей эхо-импульсной системы, акустические сигналы в которой подаются и принимаются через волноводы в виде стальных стержней [4, 5]. Излучение импульса в жидкость может осуществляться через стержневой волновод, один конец которого находится в среде с безопасными для работы условиями. На этом конце располагается источник УЗ сигнала. Другой конец погружается в агрессивную жидкость и подводится к участку визуализации

для его зондирования. Для регистрации ультразвукового эхо-сигнала, отражённого от объекта исследования, используется многоканальная волноводная система в виде пучка из металлических стержней, один торец которого находится вблизи объекта визуализации, обеспечивая широкий угол обзора и высокое разрешение. Стержни являются достаточно длинными, так что второй торец указанного пучка находится вне агрессивной жидкости, где уже можно принимать сигналы традиционными методами. При использовании стержней с диаметром, меньшим длины волны, каждый из стержней-волноводов проводит только три типа волн, соответствующих квазипродольной, изгибной и крутильной модам. Квазипродольная мода характеризуется гораздо большей групповой скоростью по сравнению с остальными, поэтому для достаточно короткого зондирующего импульса и длинного волновода быстрая импульсная волна разделяется во времени от отстающих от неё остальных мод. Связь между волноводами может быть минимизирована путем правильного их расположения в матрице и подбора материала, удерживающего стержни, с оптимальными акустическими свойствами.

Метод обработки сигналов основан на голографическом подходе [6], который обеспечивает полную пространственно-временную реконструкцию падающе-

*E-mail: sa.petrosjan@physics.msu.ru

†E-mail: sergey@acs366.phys.msu.ru

го акустического поля, принимаемого волноводной системой. В настоящей работе для оптимизации параметров многоканальной волноводной системы и создания приемного прототипа для последующей экспериментальной проверки в воде использовалось численное моделирование методом конечных элементов в среде COMSOL.

1. ТЕОРИЯ

Численное моделирование основывается на решении уравнений теории упругости в жидкости и твердом теле для каждого элементарного объемного элемента среды. Рассмотрим теорию распространения упругих и акустических волн в среде. Будем использовать лагранжеву формулировку для описания деформаций [7, 8]. Акустический импульс, приложенный к излучающему волноводу, представляет собой продольную упругую волну, возникающую из-за колебаний поверхности волновода. Распределение смещения в твердом теле рассчитывается из уравнения движения

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = F_V - \nabla_x P, \quad (1)$$

где \mathbf{u} — вектор смещения среды, а P — первый тензор напряжений Пиоли-Кирхгофа. Он выражает механические напряжения в деформированном состоянии в координатах исходного недеформированного состояния. В уравнении (1) плотность ρ_0 соответствует плотности материала в исходном недеформированном состоянии, вектор объемной силы F_V также задается относительно недеформированного объема.

Уравнение (1) можно переписать через тензор напряжений Коши σ как

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = F_V - \nabla_x \sigma, \quad (2)$$

где плотность ρ соответствует плотности в текущем деформированном состоянии, вектор объемной силы F_V имеет компоненты в текущей конфигурации, заданной относительно деформированного объема, и оператор дивергенции вычисляется относительно пространственных координат. Давление p рассчитывается через след тензора напряжений: $p = -\text{tr}(\sigma)/3$. Тензор напряжений является симметричным тензором второго ранга. Решая уравнение (2) для рассматриваемой системы, можно получить выражение для компонент тензора напряжений в зависимости от пространственных координат и времени. Компонента Z (ось Z проходит вдоль волновода) тензора напряжений может быть использована для описания продольной упругой волны, распространяющейся в волноводе. После достижения этой волной выходного торца волновода, в жидкости возбуждается волна давления, которая попадает на исследуемый объект, частично отражается от него и, тем самым, несёт информацию о его размере, форме и расположении в пространстве.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для выбора типа, материала и толщины торцевых пластин, посредством которых крепятся стержни, была создана численная модель распространения упругих волн одиночного стержня, конечный участок которого закреплен в пластине. Проводился расчёт распространения акустической волны, состоящей из 5 периодов гармонического сигнала частоты 1 МГц, из воды (слой 30 мм) в стержень из нержавеющей стали (диаметр 1 мм, длина 500 мм), окруженный воздухом. Диаметр плоского пьезоизлучателя, помещенного на дне водного слоя соосно со стержнем, составлял 3 мм. Результатом расчёта являлись значения компонент тензора механических напряжений во всех точках стержня в последовательные моменты времени в пределах заданного временного окна. По анализу формы сигнала, распространяющегося вдоль стержня, выбирались подходящие варианты закрепления. Целью моделирования являлось нахождение условия, когда утечка сигнала во входную пластину не приводила к значительному уровню переотражений в ней, чтобы на выходном торце имелась возможность выделения квазипродольной моды на фоне паразитных реверберационных сигналов.

Следующим шагом являлось моделирование процесса распространения сигнала в системе связанных волноводов. Для иллюстрации приведены результаты моделирования системы, состоящей из 3-х стальных стержней (сталь 316LC, диаметр — 1 мм, длина — 800 мм), соединенных двумя стальными пластинами ($9 \times 6 \times 3 \text{ мм}^3$) с диаметром отверстий 1.2 мм. Между пластинами и волноводами для фиксирования конструкции и уменьшения взаимодействия УЗ импульса с пластиной помещались кремнезёмные трубки длиной 3.6 мм и толщиной стенки 0.1 мм. Первая пластина располагалась на левом конце (приёмном, рис. 1а) на расстоянии 0.5 мм от начала волноводов, вторая пластина — на правом на расстоянии 3 мм от концов волноводов. Между пластинами для предотвращения касания волноводов расположены распорки из стальных листов ($5 \times 2 \times 0.5 \text{ мм}^3$, рис. 1б). Представлены случаи для 3 и 5 штук при расстояниях между ними 197.5 мм и 132 мм, соответственно. На левом конце крайнего волновода задавалась продольная (z) компонента смещения вдоль волновода в виде импульса с гауссовой огибающей, заполненного косинусом на частоте $f = 1 \text{ МГц}$ и состоящего из 5 циклов. Для данной системы методом конечных элементов был численно рассчитан тензор напряжений и смещение в зависимости от координат и времени. Для приведённого случая ослабление сигнала (по огибающей продольной компоненты тензора напряжений, рис. 1в) на выходном конце возбуждаемого волновода составило 3.5 дБ. Также можно оценить влияние распорок и пластин на перекрестные наводки в волноводах. Во 2-м и 3-м стержнях возбуждаются импульсы с амплитудой около 35% (−9.1 дБ) от поданного в начальный момент сигнала и смещенных на 9 мкс относительно импульса в 1-м

волноводе. Для случая с 5-ю распорками видно, что около 63% (–4 дБ) по амплитуде огибающей тензора напряжений от поданного импульса доходит до правого конца в возбуждаемом волноводе. Во 2-м и 3-м стержнях возбуждаются импульсы с амплитудой около 30–40% от поданного в начальный момент сигнала и смещенных на 8–10 мкс относительно импульса в 1-м волноводе. Из рассчитанных данных видно, что при увеличении числа распорок от 3 до 5 штук существенных изменений для возбуждаемого импульса не наблюдается. На выходном торце волновода импульс затухает в 1.5 раза для системы с 3-мя распорками и в 1.57 раз для системы с 5-ю распорками при длине 800 мм. На концах 2-х других волноводов за счет присутствия связи между стержнями возбуждается импульс, по амплитуде в 2.3 раза меньший и смещенный по времени по сравнению с импульсом, подаваемым на вход первого стержня. Полученные в данном примере уровни перекрестных помех достаточно велики для первичной отработки на практике для получения изображений, поэтому было принято решение создавать образец с пластинами с большим коэффициентом поглощения и большей разницей акустических импедансов, но не обладающий такой же термостойкостью (для отработки алгоритма построения изображений в воде). Для случая пластиковых пластин тех же размеров в конфигурации с тремя проставками ослабление сигнала на выходном торце первого волновода составило 2.5 дБ, а уровень паразитного сигнала в соседнем волноводе относительно выходного уровня сигнального волновода составил –14 дБ, что является хорошим результатом для многоканальных систем УЗ визуализации, в частности, медицинско-диагностических.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Основной целью настоящего этапа было выполнение ультразвуковой визуализации с помощью многоканальной волноводной системы в неагрессивной среде в качестве следующего шага исследования после предыдущих испытаний на синтезированной волноводной матрице [5]. Было создано несколько макетов волноводных сборок. На иллюстрациях представлена наиболее удачная. Данная многоканальная волноводная система была составлена из 1024 стержней из нержавеющей стали (рис. 2), представляющих фазированную антенную решётку в форме квадратной матрицы размером 32×32 с пространственным периодом 1.5 мм по осям X и Y . Диаметр стержней составлял 1 мм, зазор между ними был равен 0.5 мм. Длина волноводов составляла 455 мм. Стальные стержни были закреплены в трёх пластинах из ABS-пластика с отверстиями диаметром 1 мм, фрезерованных на станке с ЧПУ, для размещения волноводов с надлежащим расстоянием. Пластины помещались в прямоугольный пластиковый корпус (рис. 2 а, б), выполненный по технологии 3D-печати, заполненный пеной для предотвращения про-

течки воды внутрь корпуса при погружении в резервуар с водой для измерений. Система (до заполнения воздушной пеной) показана на рис. 2 в, г, д. Торцевые и опорные (центральные) пластины были сначала вклеены в корпус, после чего стержни вставлялись в отверстия один за другим, начиная с самого дальнего (из 32-х) слоя относительно открытой стороны корпуса, после чего проводилось заполнение пеной, предназначенной для герметизации корпусов ультразвуковых преобразователей с тыльной воздушной нагрузкой.

Идея ультразвуковой визуализации с помощью предлагаемой системы заключается в обработке сигналов, зарегистрированных на внешнем (выходном) конце системы, в то время как акустическое поле, содержащее информацию о рассеивателях, распространяется в исследуемой среде и поступает на входной конец системы. Регистрация сигналов может быть выполнена различными способами, например, сканирующим лазерным виброметром, двумерной многоэлементной решеткой, связанной с выходной поверхностью волноводной системы, или реконструкцией с использованием акустической голографии. На данном этапе представлены результаты, полученные методом акустической голографии путем регистрации сигналов акустического давления в воде на некотором расстоянии от выходного конца системы [6].

Для этого была использована экспериментальная установка по синтезу апертуры путем сканирования поля одним гидрофоном. Сфокусированное ультразвуковое поле генерировалось пьезокерамическим одноэлементным датчиком, размещенным в резервуаре, заполненном дегазированной водой (система очистки WTS, Precision Acoustics, Ltd., Великобритания) — см. рис. 3 а б. Визуализируемые рассеиватели представляли собой контурное изображение из поглощающего ультразвук материала (пластилин), расположенное на поверхности преобразователя. Излучатель устанавливался таким образом, чтобы акустическая ось Z была ориентирована горизонтально. Резонансная частота преобразователя составляла 1.072 МГц; апертура и фокусное расстояние источника составляли 100 мм и 70 мм, соответственно. Источник работал от генератора (Agilent 33250A, Agilent Technologies, Inc., США) совместно с усилителем выходной мощностью до 9 Вт. Сигнал возбуждения состоял из 2-х циклов резонансной частоты. Волноводная система была погружена в резервуар с водой и расположена горизонтально перед датчиком таким образом, чтобы расстояние от центральной точки преобразователя до приемного конца системы составляло 40 мм. Падающее акустическое поле возбуждало входные торцы волноводов. После прохождения сигнала вдоль волноводной системы, выходной конец сборки излучал акустическое поле, которое регистрировалось игольчатым гидрофоном (HNA-0400, ONDA corp., США) на удалении 5 мм вдоль плоскости XY , параллельной выходному концу системы (рис. 3 в). Сканирование проводилось путём последовательного помещения гидрофона в узлы квадратной сетки раз-

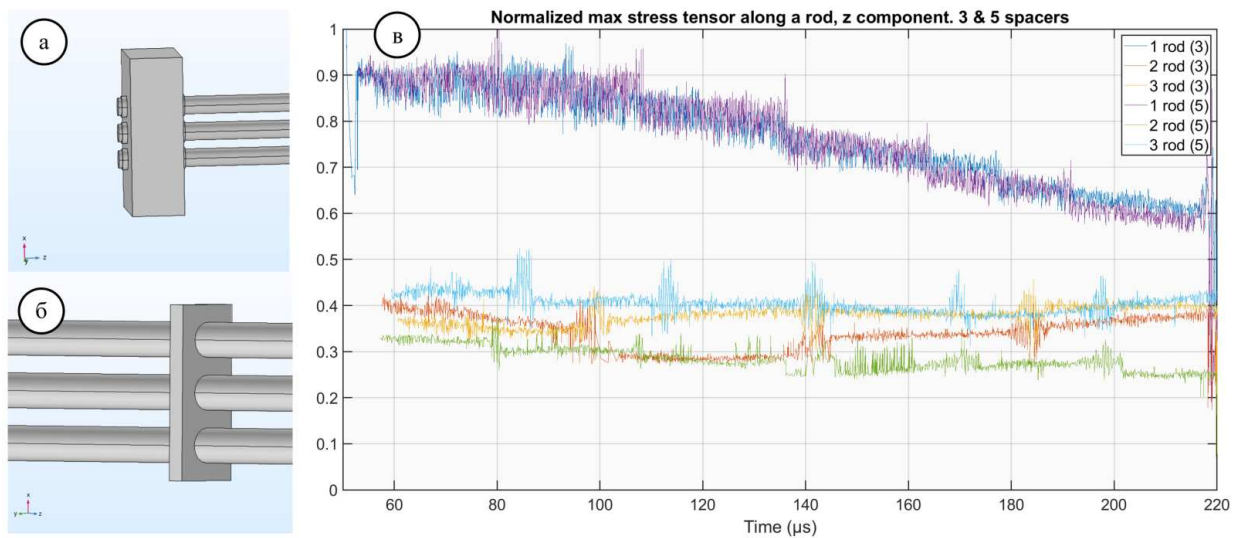


Рис. 1: Численная модель для оценки влияния способа закрепления торцов (а) и дистанционных проставочных пластин (б) на утечку сигнала в соседние стержни.

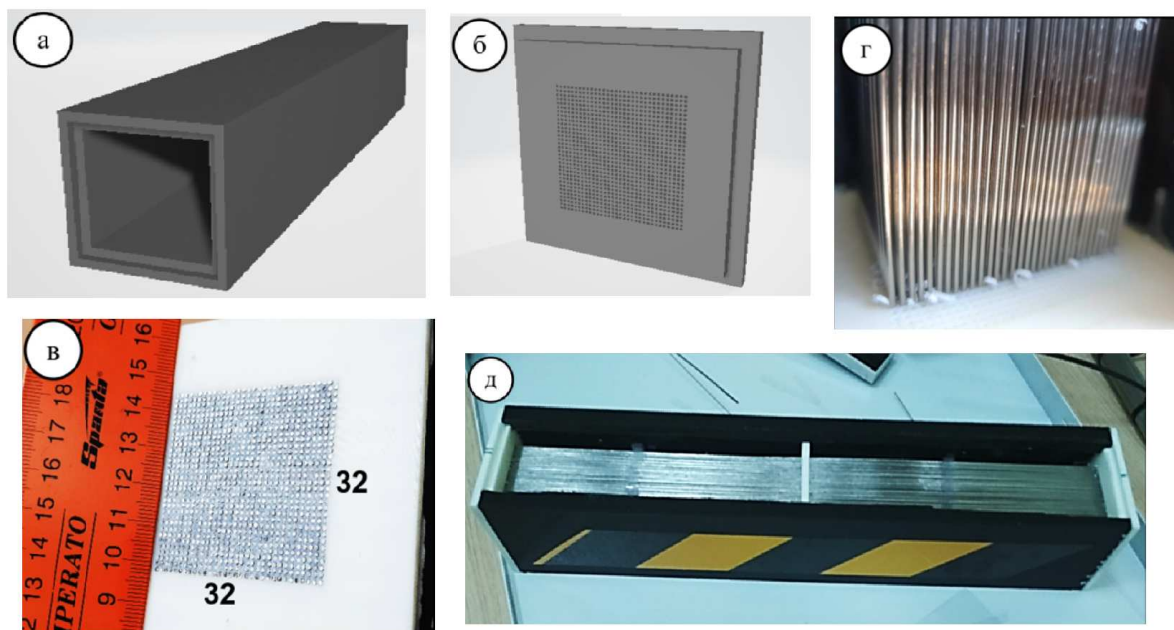


Рис. 2: Корпус волноводной сборки (а), торцевые крышки (б) и дистанционные вставки выполнены из пластика методом 3d печати. Приведены результаты для одной из сборок, имеющей 1024 канала (в) в виде волноводов из нержавеющей стали (г, д) диаметром 1 мм, длиной 455 мм, расположенных с периодом 1.5 мм.

мером 60×60 мм и шагом 0.5 мм. Во время процедуры синтеза апертуры движение горизонтально ориентированного гидрофона осуществлялось с помощью системы трехмерного позиционирования с ЧПУ (UMS3, Precision Acoustics, Ltd., Великобритания). В каждом узле сетки сканирования форма сигнала электрического сигнала, получаемого с гидрофона после предусилителя, регистрировалась осциллографом (TDS5054, Tek-

tronix, Inc., США), усреднялась 128 раз для уменьшения шума, а затем передавалась в компьютер для последующей обработки. Процедура измерения была автоматизирована с использованием программы, написанной в среде LabView. Записанные сигналы были сохранены в компьютере и затем обработаны в программе, созданной в среде MatLab.

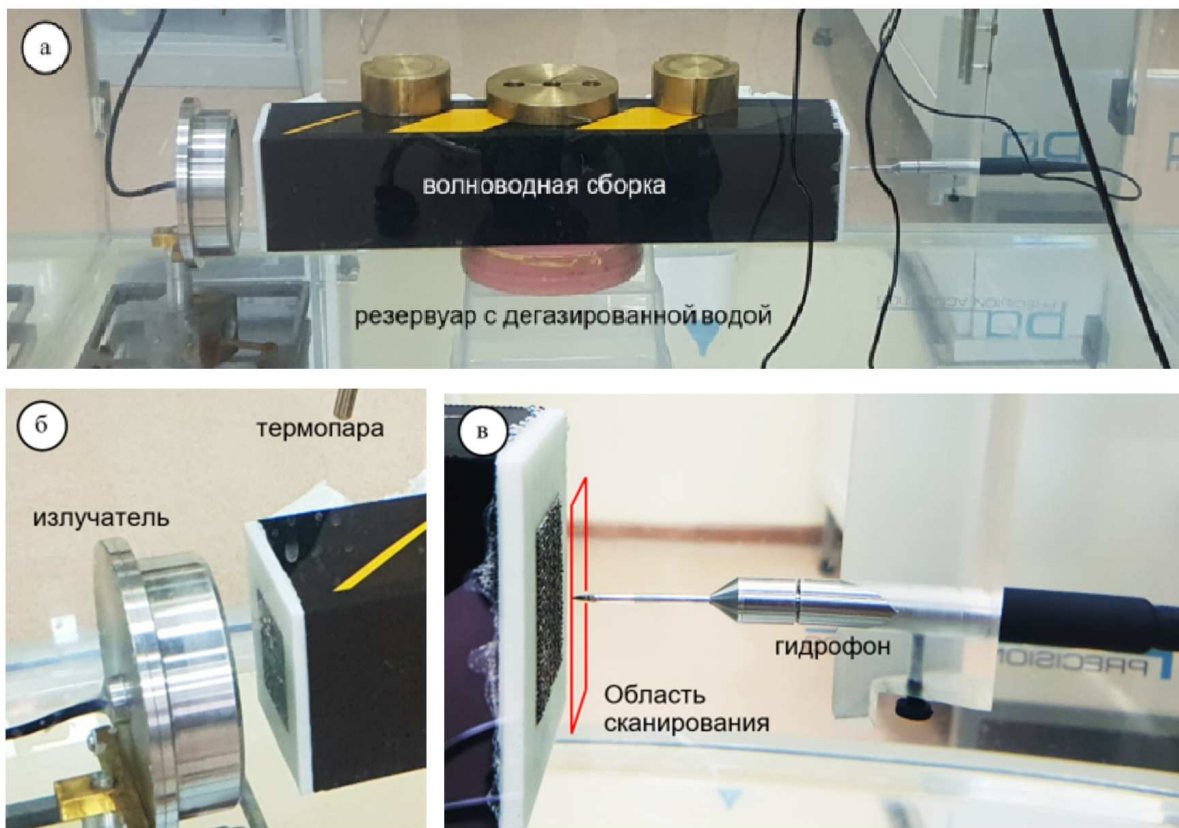


Рис. 3: *a* — Схема эксперимента по визуализации неоднородностей на поверхности излучателя, *б* — Фокусирующий излучатель с апертурой 100 мм и фокусным расстоянием 70 мм излучает импульс из 5 периодов частоты 1 МГц в воду на расстоянии 40 мм от входного торца волноводной системы, *в* — сигнал, излучаемый в воду выходным торцом системы, регистрируется сканирующим гидрофоном в точках плоскости на расстоянии 5 мм

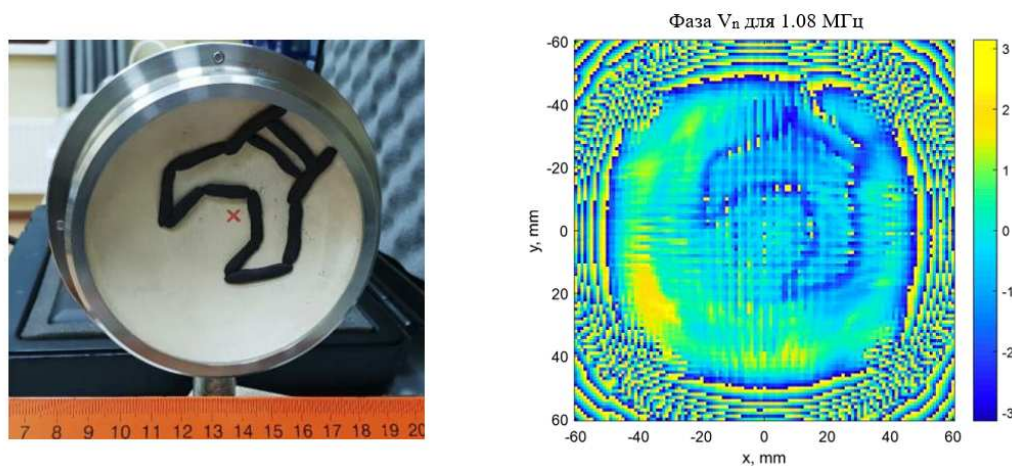


Рис. 4: *a* — Преобразователь с контуром поглощающего ключа, *б* — восстановленное фазовое распределение на его поверхности

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Метод обработки поля, основанный на описанном выше голографическом подходе, позволяет определить

пространственно-временное распределение акустического поля в интересующей области. Целью настоящей работы была реконструкция контура искусственных рассеивающих объектов, размещенных на поверх-

ности излучающего преобразователя. В этом случае интересующей областью пространства является поверхность преобразователя, которая содержит исследуемые цели. После обработки принятых сигналов и процедуры фазовой коррекции двумерное распределение нормальной компоненты колебательной скорости на поверхности преобразователя восстанавливалось во всей частотной полосе излучаемого сигнала. Наиболее контрастное изображение получалось на резонансной частоте преобразователя. Восстановленное фазовое распределение нормальной компоненты скорости вдоль поверхности преобразователя представлено на рис. 4. Левая сторона содержит изображение преобразователя с нанесённым на его поверхность контуром гаечного ключа из пластилина. Структура контура хорошо локализуется с наличием некоторых артефактов, связанных регулярностью структуры и предельным периодом решётки, близким к длине волны на частоте 1 МГц. Как и в предыдущем исследовании синтезированной волноводной матрицы [5], многоканальная волноводная сборка демонстрирует широкие углы обзора. В данном примере апертура составляла 5×5 см, расстояние между излучающим преобразователем и входным концом волноводной системы было равно 4 см, а размер области изображения составлял 12×12 см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложен принцип и реализована волноводная система для визуализации объектов в жидкости. Методом конечных элементов проведено численное моделирование процессов распространения упругих волн в волноводах. Показано, что система позволяет получать изображение объектов, помещенных в жидкость. Регистрируя колебания торцов волноводов с помощью матрицы пьезоэлектрических преобразователей или лазерного сканирующего виброметра и используя акустическую голографию для восстановления структуры акустического поля на плоскости, можно получить изображение рельефа поверхности объектов и неровностей, помещенных в жидкость.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-72-10284) и РФФИ (грант № 18-02-00991).

[1] Kazys R., Voleisis A. et al. // Sensor J. 2006. **6**, N5. P. 1134.
[2] Baque F. // Nucl. Tech. 2005, **150**, N 1. P. 67.
[3] Bond L. J., Doctor S. R. et al. // Advanced Nuclear Fuel Cycles and Systems, (GLOBAL 2007), P. 1274.
[4] Tsysar S. A., Petrosyan S. A., Svet V. D., Sapozhnikov O. A. // Proc. Mtgs. Acoust., 2018, **35**, 055001–1–5.

[5] Tsysar S. A., Petrosyan S. A., Sapozhnikov O. A., Svet V. D. // Proc. Mtgs. Acoust., 2017, **32**, 030013–1–5.
[6] Sapozhnikov O. A., Tsysar S. A., Khokhlova V. A., Kreider W. // J. Acoust. Soc. Am. 2015, **138**, N 3, P. 1515.
[7] Holzapfel G. A. John Wiley & Sons, 2000.
[8] Bower A. F. CRC Press, 2009.

Acoustic imaging of objects in liquids using a matrix of rod waveguides

S. A. Petrosyan^{1,a}, S. A. Tsysar^{1,b}, V. D. Svet², O. A. Sapozhnikov¹

¹Department of Photonics and Microwave Physics, Faculty of Physics,
Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

²N. N. Andreyev Acoustics Institute, Moscow 117036, Russia

E-mail: ^aasa.petrosjan@physics.msu.ru, ^bbsergey@acs366.phys.msu.ru

There are several acoustic imaging methods for studying opaque liquids with thermal inhomogeneities, for example, aggressive chemically active liquids and molten metals, where the use of electromagnetic waves is often difficult or simply impossible, and the use of acoustic transducers for receiving ultrasonic waves involves difficulties. The main problem in this case is the protection of the piezoelectric transducer from the influence of an aggressive environment and the relatively low sensitivity of high-temperature receiving piezoelectric sensors, which complicates the use of traditional ultrasound imaging systems. In this paper, we propose a method for detecting and visualizing objects using a scanning echo-pulse system, in which acoustic signals are received through waveguides in the form of steel rods. The echo pulse can be emitted into a liquid using a high-temperature piezoelectric transducer that can withstand such harsh conditions, or through a rod waveguide, the end of which is in an environment with safe working conditions. This end is the source of the ultrasonic signal. The other end is immersed in an aggressive liquid and brought to the investigated area to probe it. To register an ultrasonic echo signal reflected from the investigated object, a multichannel waveguide system is used in the form of a bundle of metal rods, one end of which is located near the visualization object, providing a wide viewing angle and high resolution. The rods are long enough, so that the second end of the specified bundle is located outside the aggressive fluid, where it is already possible to receive signals by traditional methods.

PACS: 43.60.-c, 43.60.+d

Keywords: acoustic waveguides, waveguide array, rods, signal processing.

Received 23 January 2019.

Сведения об авторах

1. Петросян Сурен Арутюнович — аспирант; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: sa.petrosjan@physics.msu.ru.
 2. Цысарь Сергей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: sergey@acs366.phys.msu.ru.
 3. Свет Виктор Дарьевич — доктор физ.-мат наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (499) 126-74-01, e-mail: vsvetd@mail.ru.
 4. Сапожников Олег Анатольевич — доктор физ.-мат наук, профессор; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru.
-