

Метод оптической регистрации акустических полей в жидкостяхС. А. Петросян^{1,*}, С. А. Цысарь¹, В. Д. Свет², Д. А. Дементьев², А. В. Чуренков³¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2²Акустический институт имени академика Н. Н. Андреева
Россия, 117036, г. Москва, ул. Шверника, д. 4³Московский физико-технический институт
Россия, г. Москва, 117303, ул. Керченская, д. 1 «А», корп. 1

Задача состоит в создании численной модели распространения акустической волны в жестком стержне, колебания которого будут регистрироваться оптическим методом, и с помощью неё найти оптимальные параметры для создания реальной системы для эффективной передачи акустического сигнала.

PACS: 43.58.+z. УДК: 534.6.08, 534.231, 534.211.

Ключевые слова: акустооптика, оптическая виброметрия, акустический волновод.

Акустическое поле представляет собой области разрежения и сжатия, распространяющиеся в веществе в виде волны. Для регистрации таких полей можно применять оптические методы. В основе лежит акустооптический эффект, заключающийся в том, что при сжатии показатель преломления вещества увеличивается, и свет при прохождении через эти участки преломляется. Если же среду осветить пучком света и за средой поставить экран, то можно увидеть изображение проекции звукового поля (рис. 1). Недостаток этого метода заключается в том, что по картине нельзя восстановить количественные значения интенсивности акустического поля.

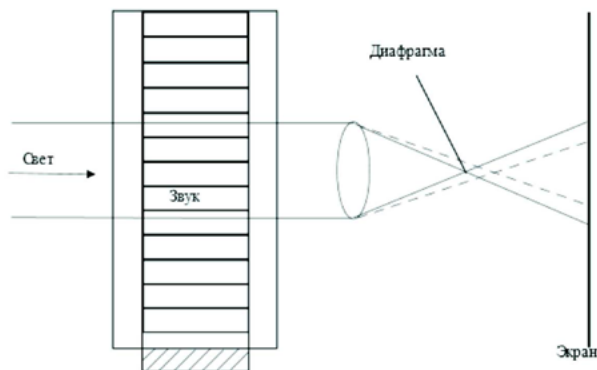


Рис. 1: Метод визуализации звука.

Существует альтернативный способ — лазерная виброметрия поверхности. Принцип работы лазерного виброметра основан на доплеровском сдвиге частоты лазерного излучения, отраженного от колеблющегося объекта. Также виброметр может определять смеще-

ние поверхности, измеряя разность фаз между опорным лазерным лучом и лучом, отраженным от исследуемой поверхности [1]. Лазерный виброметр тяжело использовать в жидкостях, так как они обладают сильным акустооптическим взаимодействием [2,3]. Задача состоит в том, чтобы избежать этого взаимодействия путём передачи акустического поля на жесткую поверхность. Данный метод позволит зарегистрировать амплитуду и фазу акустического поля на плоской поверхности и решить обратную волновую задачу.

Конкретная задача состоит в том, чтобы создать численную модель распространения акустической волны из жидкости через жесткий стержень, колебания которого будут регистрироваться оптическим методом, и с помощью неё найти оптимальные параметры системы для эффективной передачи акустического сигнала.

Рассмотрим систему, состоящую из трёх сред: среда 1 — вода; среда 2 — тонкий стержень длины l постоянного сечения с диаметром d ; среда 3 — воздух. Стержень считается тонким в том случае, когда радиус стержня мал по сравнению с длиной волны. Запишем уравнение движения волны в стержне с учетом вязких сил

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial X^2} + \frac{E'}{\rho} \frac{\partial^3 \xi}{\partial t \partial X^2}. \quad (1)$$

Для решения задачи о колебаниях стержня конечной длины необходимо учесть граничные условия на его обоих концах. Направим ось OX вдоль стержня и будем считать, что на одном конце стержня при $x = 0$ в направлении его оси действует вынуждающая периодическая сила. Давление этой силы будет описываться следующей формулой:

$$P_0 = P e^{i\omega t}. \quad (2)$$

В сечении при $x = 0$, где приложено внешнее давление, возникающее в стержне напряжение, равно напряжению, создаваемому этим давлением P :

$$(E + i\omega E') \frac{\partial \xi(X)}{\partial X} = P. \quad (3)$$

*E-mail: petrosyan-suren1@mail.ru

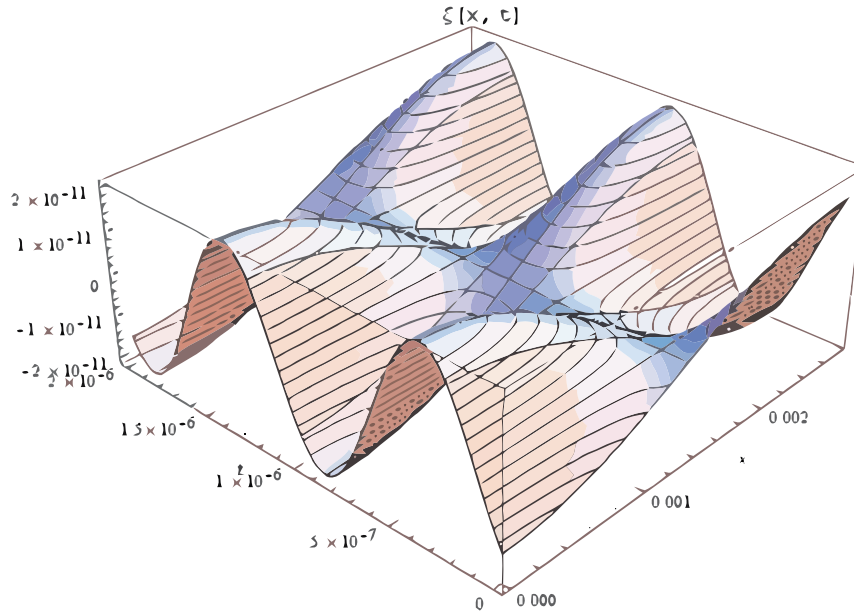


Рис. 2: Зависимость смещения ξ] (м) от длины стержня X (м) и времени t (с) на частоте 1 МГц.

Второй конец стержня при $x = l$ свободен и поэтому напряжение равно нулю:

$$(E + i\omega E') \frac{\partial \xi(X)}{\partial X} = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения с учетом граничных условий имеет вид

$$\xi(X, t) = -P \frac{ch[ik'(l - X)]}{ik'(E + i\omega E') sh(ik'l)} e^{i\omega t}, \quad (5)$$

где E и k с учётом вязкости формально являются комплексными величинами и связаны друг с другом соотношением

$$k' = k + ik = \frac{2\pi}{\lambda} + i\alpha f = \omega \sqrt{\frac{\rho}{E + i\omega E'}}. \quad (6)$$

В случае, когда затухание мало, резонанс возникает на близких частотах, что и для стержня без затухания. Отличие реального стержня от стержня с затуханием в том, что амплитуды волн при резонансе не достигают бесконечных пределов, а имеют большую конечную амплитуду, в отличие от случая без затухания.

Были проведены расчеты распространения акустической волны через рассматриваемую систему с различным набором входных параметров.

Для иллюстрации характерных результатов приведём расчёт для следующего набора параметров (рис. 2): амплитуда давления в среде 1: $P = 1$ Па, частота воздействия $f = 1$ МГц. Волновое число в среде 2: $k = 2\pi/\lambda + ik = (1142.4 + 0.5i) \text{ м}^{-1}$ (для частоты 1 МГц, в расчётах k меняется в зависимости от частоты), диаметр стержня $d = 0.5$ мм.

Также был проведен эксперимент, основная цель которого заключалась в исследовании возможности регистрации малых колебательных смещений акустического волновода, выполненного в виде стального стержня, методом оптической интерферометрии. Схема установки показана на рис. 3а. Волновод 2 изготовлен из стали, длина которого равна 289 мм, диаметр — 5.9 мм. Масштабы проведённого эксперимента существенно превосходят целевые и были выбраны такими для проверки принципиальной возможности оптической регистрации акустических возмущений при прохождении через стержневой волновод. Характерные результаты представлены на рис. 3б. Видно, что регистрируемый сигнал хорошо различим, с высокой точностью можно выделить амплитудные и фазовые значения. Резонанс на частоте 897.6 кГц оказался высокочастотным ($Q = 1730$), а зарегистрированная амплитуда колебательного смещения составила 25 нм в воздухе. При погружении стержня в воду на основной моде (частота 30 кГц) амплитуда смещения составляет 12 нм, а на частоте 263 кГц — 9 нм.

В результате работы был проведён численный анализ упругих деформаций стержня при возбуждении акустической волной и проведено сопоставление численных и экспериментальных результатов. Полученные данные свидетельствуют о возможности регистрации малых колебательных смещений на конце волноводных стержней, вызванных акустическими сигналами, распространяющимися в жидкостях, оптическими методами, например, интерферометром типа Фабри–Перо.

Работа поддержана грантами РФФИ №14-02-00331 и №14-02-00426.

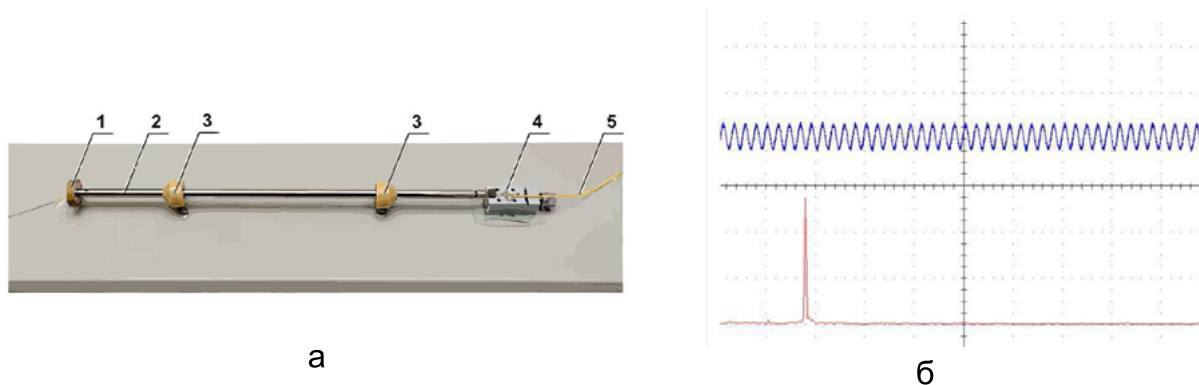


Рис. 3: а — Схема измерений: 1 — возбуждающий пьезопреобразователь; 2 — акустический волновод; 3 — держатели; 4 — микроподвижный юстировочный узел; 5 — оптическое волокно (сигнальное плечо интерферометра Фабри—Перо). б — Результат эксперимента: детектированная модуляция оптического сигнала в интерферометре (синяя линия) и спектральный пик (красная линия).

- [1] Stanbridge A.B., Ewins D.J. Trans. ASME—Design Eng. Tech. Conf., **3**, P. 1207. (1995).
 [2] Halliwell N.A. Laser vibrometry optical methods in engineering metrology. Chapter 6, pp. 179–211. (London: Chapman and Hall, edited by Williams D.C., 1993).
 [3] Clement G., Liu R., Letcher S. et al. J. Acoust. Soc. Amer. **104**, N. 3, P. 1266. (1998).
 [4] Коробов А.И., Буров В.А., Дмитриев К.В., Румянцев

ва О.Д. Резонансная акустическая спектроскопия твердых тел. Методическая разработка спецпрактикума кафедры акустики. (М.: Физический факультет МГУ, 2012). 30 с.

- [5] Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. (М.: МГУ, 1960). 337 с.

Method of optical registration of acoustic field in liquids

S. A. Petrosyan^{1,a}, S. A. Tsysar², V. D. Svet³, D. A. Dementev⁴, A. V. Churenkov²

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

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

³Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow 117303, Russia
 E-mail: ^apetrosyan-suren1@mail.ru

The main aim of the work is to create a numerical model of acoustic wave propagation in rigid rod. Vibrations of the end of the rod will be recorded by an optical method. Developed model can help to find the optimal parameters to create a real physical system for the efficient optical registration of the acoustic signal.

PACS: 43.58.+z.

Keywords: acousto-optics, optical vibrometer, acoustic waveguide.

Received 27.07.2015.

Сведения об авторах

1. Петросян Сурен Арутюнович — студент; тел.: (985) 637-11-67, e-mail: petrosyan-suren1@mail.ru.
2. Цысарь Сергей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: sergey@acs366.phys.msu.ru.
3. Свет Виктор Дарьевич — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (916) 625-71-67, e-mail: vsvetd@mail.ru.
4. Деметьев Дмитрий Аронович — научный сотрудник; тел.: (905) 785-88-11, e-mail: dementda@mail.ru.
5. Чуренков Александр Владиславович — канд. физ.-мат. наук, ассистент; тел. (916) 541-10-69, e-mail: churenkov@mtu-net.ru.