

## Отражение интенсивных сфокусированных акустических пучков от акустически мягкой границы

М. С. Дерябин<sup>1,2,\*</sup>, Д. А. Касьянов<sup>1,†</sup>, В. В. Курин<sup>2,‡</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН

Россия, 603950, Нижний Новгород. БОКС-120, ул. Ульянова, 46

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского

Россия, 600950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

(Статья поступила 06.12.2017; Подписана в печать 08.12.2017)

Исследуются нелинейные эффекты в интенсивных сфокусированных акустических пучках отражённых от акустически мягкой границы. Для проведения экспериментов использовалась экспериментальная установка, созданная на базе измерительного комплекса фирмы Precision Acoustics (Ultrasound Measurement System Control Centre). Для регистрации акустических сигналов применялись миниатюрные оптоволоконные гидрофоны (Fibre-optic Hydrophone System фирмы Precision Acoustics), которые обладают широким частотным и динамическим диапазоном. Для излучения использовался фокусирующий излучатель фирмы Olympus, имеющий рабочую частоту 1 МГц и фокусное расстояние 16 см. В качестве акустически мягкой границы использовалась граница раздела вода–воздух. Исследованы основные закономерности отражения сфокусированных акустических пучков от мягкой границы. Показано, что основным параметром, определяющим трансформацию профиля волны в отражённом пучке, является взаимное положение отражающей границы по отношению к фокальной области излучателя. При совмещении фокальной плоскости излучателя с поверхностью воды, можно получить заметное увеличение интенсивности акустического поля в отраженном акустическом пучке по сравнению со случаем фокусировки в «безграничной среде».

PACS: 43.25.+y

УДК: 534.2

Ключевые слова: нелинейность, акустика, ударная волна, мягкая граница.

### ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–3] проводились исследования нелинейных эффектов в интенсивных квазиплоских акустических пучках отраженных от акустически мягкой границы. В результате исследований показано, что при отражении интенсивного акустического пучка от мягкой границы существует эффект значительного перераспределения энергии в спектре отражённых нелинейных волн, проявляющийся на небольших волновых расстояниях от отражающей границы. Данный эффект приводит к появлению экстремумов в распределениях амплитуды и интенсивности в отражённом акустическом пучке около отражающей границы. Представленные в настоящей работе исследования являются естественным продолжением работ, представленных в [1–3]. Экспериментально исследуются нелинейные эффекты в отраженных интенсивных пучках, падающих на акустически мягкую границу сфокусированными. Особое внимание уделено взаимному расположению границы и геометрическому положению фокальной области.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования профиля акустической волны проводились на установке, блок–схема которой представлена на рис. 1. Для измерений использовался миниатюрный оптоволоконный гидрофон.

Эксперименты проводились на установке, созданной на базе измерительного комплекса фирмы Precision Acoustics (Ultrasound Measurement System Control Centre), включающего: ванну из оргстекла 1 с размерами 1x1x1 м, металлический каркас 2 на котором смонтированы манипуляторы для гидрофона и излучателя, управляющий компьютер 3 и осциллограф Agilent DSO-X 3034 4. Абсолютная точность перемещения гидрофона с помощью манипулятора составляет 6 мкм. В ванну заливалась особо чистая дегазированная и деионизированная вода с удельным сопротивлением не менее 18 МОм·см, произведенная установкой на базе мембранного дистиллятора ДМ-4Б (Россия). Высота уровня поверхности воды в ходе экспериментов регулировалась. Температура контролировалась при помощи лабораторного термометра 5 с точностью 0,1°C. Излучатель 6 монтировался на специальной подставке 7, позволяющей с помощью опорных микровинтов 8 максимально точно поддерживать перпендикулярность акустической оси излучателя и поверхности воды 9.

В эксперименте использовался фокусирующий излучатель фирмы Olympus, с углом раскрытия апертуры 18°, фокусным расстоянием  $F = 16.0$  см, работающий в импульсном режиме. Этот преобразователь имеет низкую добротность  $Q$  не более 3-х, что позво-

\*E-mail: [mmm1984@inbox.ru](mailto:mmm1984@inbox.ru)

†E-mail: [da\\_kasyanov@ipfran.ru](mailto:da_kasyanov@ipfran.ru)

‡E-mail: [kurin@rf.unn.ru](mailto:kurin@rf.unn.ru)

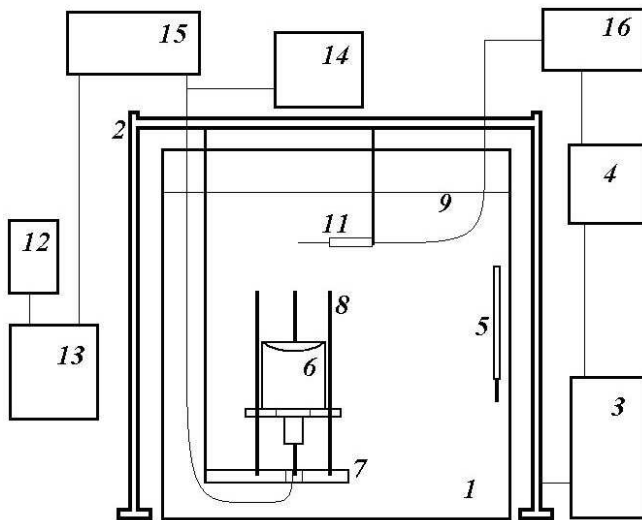


Рис. 1: Блок-схема экспериментальной установки

ляет генерировать импульсы небольшой длительности всего в несколько периодов. Использование коротких акустических импульсов позволяет производить измерения практически у поверхности воды. Длительность импульсов и частота излучения составляли  $\tau = 5.0$  мкс и  $f_0 = 1.00$  МГц соответственно, частота повторения импульсов  $F = 5$  Гц. Длительность импульсов выбиралась из условий отсутствия возмущений геометрии границы при воздействии на неё акустическим полем. Регистрация формы нелинейных волн в произвольной точке отраженного пучка осуществлялась миниатюрным калиброванным оптоволоконным гидрофоном 11 фирмы Precision Acoustics с размером активного элемента  $\delta = 0.1$  мм, имеющим калибровку от производителя в диапазоне до 30 МГц (для нужд эксперимента гидрофон был откалиброван в полосе до 60 МГц).

Излучающая часть установки, состоит из задающего генератора 12 (Tektronix AFG3022), высококачественного усилителя мощности Amplifier Research 800A100A 13, контрольного цифрового осциллографа 14 (Tektronix TDS3032B) и согласователя импедансов I1003 Amplifier Research 15. Принятый сигнал с гидрофона, предварительно обрабатывался устройством Fibre-optic Hydrophone System фирмы Precision Acoustics 16, регистрировался и предварительно анализировался осциллографом Agilent DSO-X 3034, а затем записывался на компьютер. Чувствительный элемент гидрофона располагался перпендикулярно акустической оси излучателя. Поэтому для работы в данной ориентации чувствительного элемента, была проведена дополнительная калибровка гидрофона [1]. Особенности методики измерений параметров интенсивных акустических полей, распространяющихся в ограниченных средах, представлены в работе [4].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В рамках работы были проведены несколько серий экспериментов, для различных расстояний между поверхностью воды и излучателем. В одной серии исследовался профиль волны распространяющейся к границе вода-воздух, а затем профиль отраженной волны. На рис. 2 приведены результаты измерений интенсивности акустической волны на акустической оси  $z$  излучателя. Местоположение границы отмечено на рисунке вертикальной прерывистой линией (на рис. 2 приведено для наглядности схематичное изображение излучателя по отношению к границе). По оси  $z$  отложено полное пройденное акустической волной расстояние. Для каждого положения границы измерения производились для четырех амплитуд акустического давления на апертуре излучателя: 1 —  $P_0 = 0.07$  МПа, 2 —  $P_0 = 0.15$  МПа, 3 —  $P_0 = 0.21$  МПа, 4 —  $P_0 = 0.26$  МПа.

В случае, изображенном на рис. 2,а граница располагалась на расстоянии 22 см за геометрическим фокусом излучателя. Распределение интенсивности вдоль акустической оси в данном случае схоже с распределением, создаваемым в фокальной области в отсутствие границы.

В случае, представленном на рис. 2,б граница располагалась на расстоянии 8 см за геометрическим фокусом излучателя. При акустическом давлении на апертуре излучателя 1 —  $P_0 = 0.07$  МПа распределение интенсивности в зависимости от дистанции распространения в отраженном акустическом пучке, практически не отличается от распределения в безграничной среде. При больших амплитудах поля 2 —  $P_0 = 0.15$  МПа, 3 —  $P_0 = 0.21$  МПа, 4 —  $P_0 = 0.26$  МПа распределение интенсивности от дистанции распространения имеет особенности. При амплитудах 3 —  $P_0 = 0.21$  МПа, 4 —  $P_0 = 0.26$  МПа на некотором расстоянии от границы распределение интенсивности акустического поля имеет максимум. Таким образом, в результате эксперимента удалось осуществить повторную сходимость акустического пучка, которая привела к образованию «второй фокальной области».

Рассмотрим результаты эксперимента, представленные на рис. 2,в. в данном случае граница располагалась в фокальной области излучателя, на месте геометрического фокуса излучателя. Для амплитуд акустического давления на апертуре излучателя 1 —  $P_0 = 0.07$  МПа, 2 —  $P_0 = 0.15$  МПа существенной разницы в распределениях интенсивности от дистанции распространения пучка при наличии или отсутствии границы нет. При амплитуде 3 —  $P_0 = 0.21$  МПа происходит растягивание области максимальной интенсивности на оси пучка. А при амплитуде 4 —  $P_0 = 0.26$  МПа, интенсивность акустической волны на оси пучка имеет минимум на расстоянии 2 см от геометрического фокуса, а на расстоянии 6 см от геометрического фокуса имеет максимум. При этом интенсивность в данном максимуме на 15 % превосходит максимальную интен-

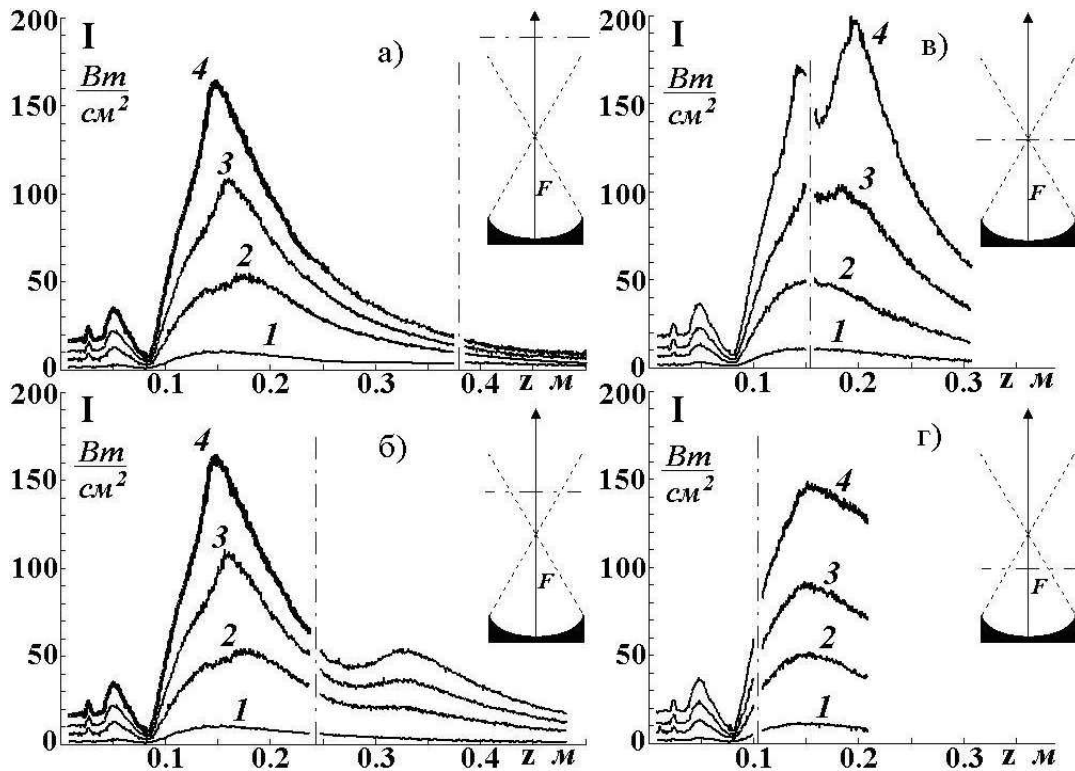


Рис. 2: Распределения интенсивности вдоль акустической оси  $z$  излучателя при разных положениях акустически мягкой границы

сивность, достигаемую в фокальной области данного излучателя в «безграничном пространстве» при тех же условиях. Образование данного максимума не связано с воздействием акустического поля на границу раздела вода-воздух, т.к. в эксперименте поддерживался режим работы излучателя не приводящий к искривлению поверхности воды [5].

На рис. 2,г представлены результаты эксперимента, когда граница располагалась на расстоянии 5 см до геометрического фокуса излучателя. В случае 1 —  $P_0 = 0.07$  МПа (малой амплитуды акустического давления на апертуре излучателя) существенной разницы в распределениях интенсивности от дистанции распространения пучка при наличии и отсутствии границы нет. В случаях 2 —  $P_0 = 0.15$  МПа, 3 —  $P_0 = 0.21$  МПа, 4 —  $P_0 = 0.26$  МПа в распределениях интенсивности акустического пучка в зависимости от дистанции распространения происходит смещение положений максимумов интенсивности, от случая «безграничного пространства». При этом измеренные максимальные значения интенсивностей в фокальной области излучателя в случае отраженного пучка ниже достигаемых в «безграничном пространстве» при тех же условиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показано, что при падении на акустически мягкую границу сфокусированного акустического пучка возникают особенности, отличающие этот случай от случая падения на ту же границу квазиплоского интенсивного пучка. Причём ситуация принципиально зависит от взаимного положения границы и геометрического положения фокальной области. Показано, что если фокальная область расположена до отражающей границы, то в отражённом пучке возможна вторичная фокусировка. При совпадении акустически мягкой границы с геометрическим фокусом излучателя, удалось зарегистрировать отражённую акустическую волну на оси излучателя, в которой, на некотором удалении от границы, интенсивность на 15%, превышала интенсивность волны образованной в фокальной области этим же излучателем при тех же условиях в «безграничном пространстве».

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИПФ РАН.

[1] Дерябин М. С., Касьянов Д. А., Курин В. В. Радиофизика. 2014. №4. С. 291.

[2] Дерябин М. С., Касьянов Д. А., Курин В. В. Эволюция

ударных волн в отраженных от мягкой границы интенсивных акустических пучках // Сборник трудов Научной конференции Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества. 2012. С. 166.

- [3] Дерябин М.С., Касьянов Д.А., Курин В.В., Гарасев М.А. Изв. вузов. Радиофизика. 2015. **58**, № 12, С. 1052.
- [4] Дерябин М.С., Касьянов Д.А., Курин В.В. Особенности проведения экспериментов по исследованию нелинейного

взаимодействия волн в ограниченных средах в лабораторных условиях. / Сборник трудов Научной конференции «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXIV сессия Российского акустического общества». I. С. 158. М.: ГЕОС, 2011.

- [5] Deriabin M., Kasyanov D., Kurin V. Laboratory experiments on interaction of powerful acoustic pulses with water-air free boundary. Forum acusticum. P. 915. 27 June–1 July, Aalborg, 2011.

---

## High-intensity focused beam reflection from acoustically soft boundary

M.S. Deryabin<sup>1,2,a</sup>, D.A. Kasyanov<sup>1,b</sup>, V.V. Kurin<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, 603950, Russia*

<sup>2</sup>*Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, 600950, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>mmm1984@inbox.ru, <sup>b</sup>da\_kasyanov@ipfran.ru, <sup>c</sup>kurin@rf.unn.ru*

Nonlinear effects are investigating on high-intensity focused beam reflection from acoustically soft boundary. Experimental setup is used based on Ultrasound Measurement System Control Centre (Precision Acoustics). Fibre-optic Hydrophone System (Precision Acoustics) is applied for acoustic field registration in broad frequency and dynamic range. Radiator place Olympus with focal distance 16 cm is used for radiating signals with carrier frequency 1MHz. As a model for acoustically soft boundary water-air interface is used. Basic characteristics of focused acoustic beams reflection are studied. It is shown that transformation of wave front in reflected beam is determined by relative position reflected boundary and focal area of focusing radiator. Coincidence reflected boundary and focal plane of focusing radiator gives noticeable increase in acoustic intensity of reflected acoustic beam in comparison with the case of focusing in «infinite medium».

PACS: 43.25.+y

*Keywords:* nonlinearity, acoustics, shock wave, soft boundary.

*Received 06 December 2017.*

### Сведения об авторах

1. Дерябин Михаил Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, зав. сектором; e-mail: mmm1984@inbox.ru.
2. Касьянов Дмитрий Альбертович — докт. физ.-мат. наук, зав. отделом, доцент; e-mail: da\_kasyanov@ipfran.ru.
3. Курин Василий Викторович — ст. преподаватель; e-mail: kurin@rf.unn.ru.