

Экспериментальное исследование дифракции ударных акустических волн на краю экрана

С. Н. Гурбатов^{1,*}, М. С. Дерябин^{1,2,†}, Д. А. Касьянов^{2,‡}, В. В. Курин^{1,§}, А. В. Тюрина^{1,¶}

¹Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, радиофизический факультет, кафедра акустики. Россия, 603950, Нижний Новгород, Гагарина, д. 23

²Институт прикладной физики РАН. Россия, 603950, Нижний Новгород, Ульянова, 46

(Статья поступила 14.11.2019; подписана в печать 15.01.2020)

В работе приведены результаты экспериментального исследования дифракции ударных акустических волн на краю экрана. Лабораторные эксперименты проводились в дегазированной дистиллированной воде при нормальных климатических условиях на установке, обеспечивающей позиционирование приемно-излучающей системы по трем линейным координатам с точностью не менее 6 мкм. В качестве излучателей использовались поршневые преобразователи с рабочими частотами 1 и 2 МГц, с различными диаметрами апертур от 1 см до 4 см. Максимальная амплитуда акустического давления на апертуре излучателей составляла 1 МПа. Регистрация профиля акустической волны осуществлялась с помощью мембранного гидрофона, имеющего практически равномерную характеристику чувствительности в полосе частот вплоть до 40 МГц. В результате экспериментов удалось обнаружить некоторые особенности дифракции интенсивных акустических пучков. В частности, вблизи акустической оси излучателя регистрируются профили акустических волн, имеющих спектральную характеристику с законом спада гармоник, существенно отличающимся от случая безграничного пространства. В поперечных распределениях амплитуд гармоник с номерами выше 7 наблюдался дополнительный экстремум, связанный как с дифракцией отдельных гармоник, так и с продолжающейся нелинейной генерацией кратных накачке частот.

PACS: 43.25.+y. УДК: 534.61.

Ключевые слова: дифракция, интенсивные акустические пучки, ударные волны.

ВВЕДЕНИЕ

Работа является продолжением цикла исследований, связанных с нелинейными эффектами в интенсивных акустических пучках [1, 2, 3, 4, 5]. В [1] исследовалась трансформация профиля пилообразной волны после отражения от акустически мягкой границы. В [2, 3] рассматривался вопрос о взаимодействии двухчастотных коллинеарных акустических пучков. В [4, 5] исследовались нелинейные эффекты в интенсивных шумовых акустических пучках мегагерцового диапазона частот. В настоящей работе исследуются особенности проявления нелинейных эффектов в интенсивных акустических пучках, дифрагирующих на краю экрана.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на экспериментальной установке, созданной на базе автоматизированного комплекса акустических измерений. Подробное описание установки приведено в [3].

В качестве излучателей использовались акустические преобразователи фирмы Oluprus с рабочими ча-

стотами 1 и 2 МГц. Размеры апертуры излучателей задавались с помощью специальных поглощающих экранов с круглым отверстием. Характерный диаметр апертуры задавался таким образом, чтобы последний дифракционный максимум распределения поля акустического давления находился на расстоянии 200 – 220 мм от апертуры излучателя. Экран в форме клина, перекрывающий полупространство, располагался на расстоянии 250 мм от апертуры излучателя таким образом, чтобы акустическая ось Z излучателя касалась вершины клина. Клин изготавливался из твердого пенопласта, покрытого водонепроницаемым покрытием. Излучение производилось в импульсном режиме. Длительность импульса составляла 5 периодов на рабочей частоте. Характерное акустическое давление на апертуре излучателя составляло 1 МПа. Достижимые в эксперименте числа Рейнольдса обеспечивали образование пилообразного профиля волны до попадания пучка в экран и интенсивные нелинейные взаимодействия в дифрагируемом интенсивном акустическом пучке после преодоления экрана.

Регистрация акустических сигналов производилась с помощью мембранного гидрофона фирмы Precision Acoustics - Differential Membrane 0.2 mm в полосе частот до 100 МГц. Гидрофон имеет сертификат калибровки в полосе частот до 40 МГц. Неравномерность характеристики чувствительности в полосе частот до 40 МГц не превышает 20%. Схема проводимых измерений приведена на рис. 1. Измерения профилей дифрагированных волн производились по поперечной координате Y (см. рис. 1) в диапазоне -30 – $+30$ мм на расстояниях от гребня экрана от 1 до 180 мм. Тра-

*E-mail: gurb@rf.unn.ru

†E-mail: mmm1984@inbox.ru

‡E-mail: da_kasyanov@ipfran.ru

§E-mail: kurin@rf.unn.ru

¶E-mail: vanilch22@gmail.com

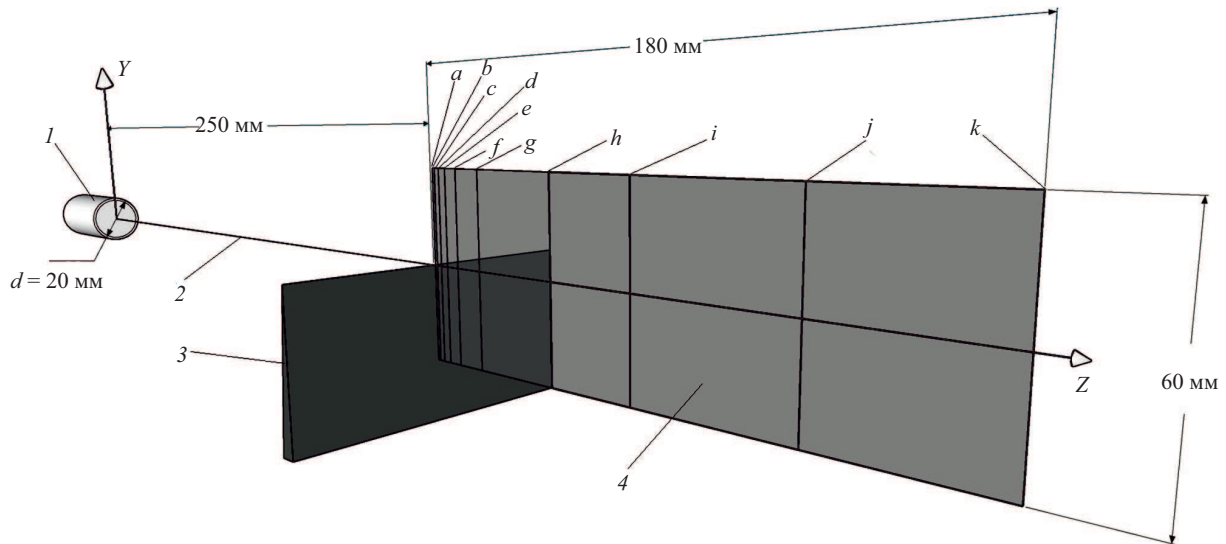


Рис. 1: Схема проводимых измерений. 1 — излучатель, 2 — акустическая ось, 3 — экран, 4 — плоскость проводимых измерений.

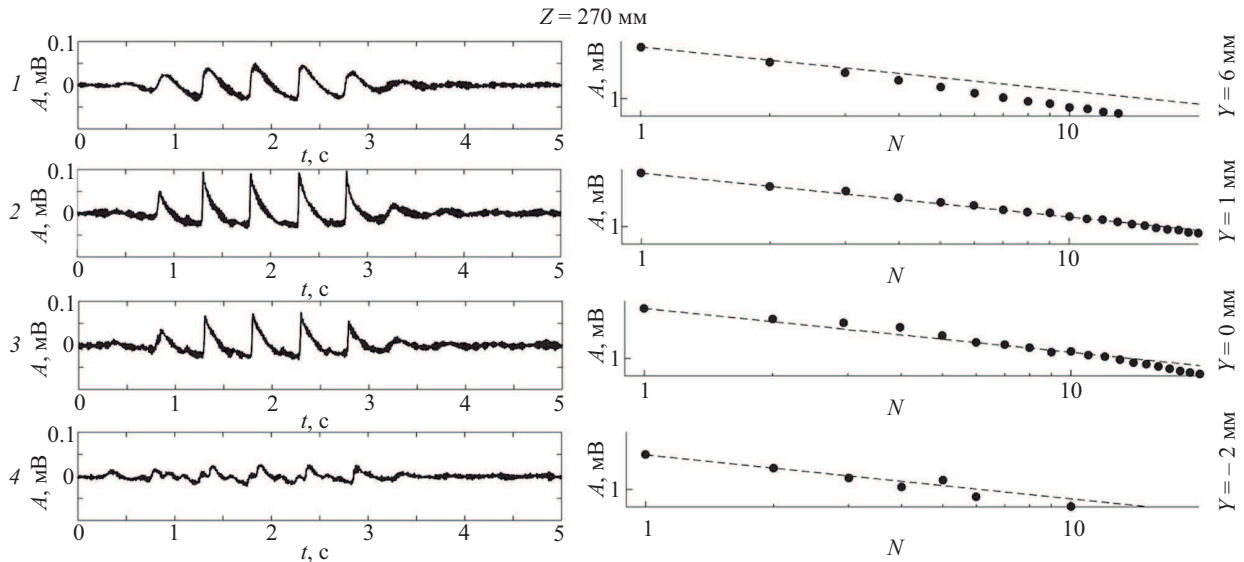


Рис. 2: Осциллограммы и амплитудные спектры зарегистрированных в эксперименте сигналов на поперечном отрезке j . Прерывистой линией на рисунке для наглядности приведено распределение гармоник сигнала вида $1/N$

ектории перемещения приемника обозначены на рис. 1 латинскими буквами $a - k$. Длина каждого отрезка составляла 60 мм. Измерения проводились с шагом по поперечной координате 0.2 мм. Для уменьшения влияния шумовых помех в каждой точке измерения записывалось от 10 до 100 реализаций принятого сигнала.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2 приведены осциллограммы и амплитудные спектры сигналов, зарегистрированных на поперечном отрезке f (см. рис. 1), расположенном на расстоянии

20 мм от острия клина. Осциллограммы приведены в мВ, а амплитудные спектры изображены в двойном логарифмическом масштабе.

Осциллограмма 1 зарегистрирована выше острия клина на 6 мм ($Y = 6$ мм), осциллограмма 2 при $Y = 1$ мм, осциллограмма 3 регистрировалась на акустической оси Z при $Y = 0$ мм, осциллограмма 4 регистрировалась ниже акустической оси при $Y = -2$ мм.

При прохождении акустического пучка с пилообразным профилем волны через экран, закрывающий половину площади волнового фронта падающего акустического пучка, происходит смещение оси пучка в сторону от полукрана по поперечной координате, как и в слу-

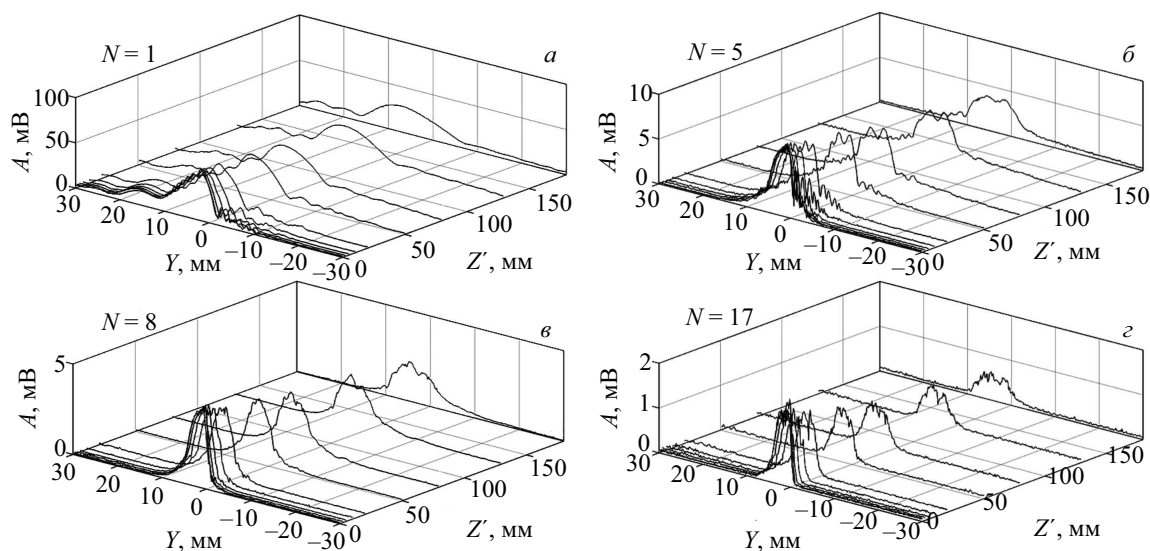


Рис. 3: Распределения амплитуд гармоник $N = 1, 5, 8, 17$ зарегистрированного акустического сигнала в области проводимых измерений. Ось Z' совпадает с акустической осью Z , и имеет начало координат на гребне экрана

чае одночастотного пучка. Однако из-за наличия широкого спектра гармоник энергетические компоненты акустического пучка, связанные с гармониками, имеющими номера выше первого, слабее отклоняются вверх от экрана. Данное явление связано с тем, что высокочастотные сигналы менее подвержены дифракции, чем высокочастотные. Одним из проявлений данного эффекта является появление отличающегося от $1/N$ закона спада гармоник в спектре регистрируемого сигнала, прошедшего через экран. Например, из рис. 2, 3) видно, что на акустической оси излучателя в спектре регистрируемого сигнала высокочастотные гармоники имеют более высокие амплитуды, чем если бы выполнялось распределение вида $1/N$.

На рис. 3 изображены распределения амплитуд гармоник $N = 1, 5, 8, 17$ зарегистрированного акустического сигнала в области проводимых измерений. Ось Z' на рисунке совпадает с акустической осью Z и имеет начало координат в месте касания с клином. На рис. 3 поперечные отрезки обозначены латинскими буквами $g - k$ так же, как это было сделано на рис. 1.

Из рис. 3 видна еще одна особенность дифракции интенсивных акустических пучков на краю экрана. На

расстояниях от экрана более 100 мм поперечные распределения гармоник сигнала с номерами выше 5 – 7 имеют два выраженных экстремума. Первый экстремум связан с продолжением нелинейной генерации первой гармоники и расположен дальше от экрана по поперечной координате. Второй экстремум проявляется из-за разной степени проявления дифракции высокочастотных гармоник и расположен ближе к акустической оси излучателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в работе результаты экспериментов, демонстрирующие некоторые особенности проявления нелинейных эффектов в интенсивных акустических пучках, дифрагирующих на краю экрана, могут быть использованы для совершенствования технических параметров медицинского или промышленного оборудования, работа которых основана на применении интенсивных ультразвуковых волн.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ, проект № 19-12-00-256.

- [1] Дерябин М. С., Касьянов Д. А., Курин В. В., Гарасев М. А. // Радиофизика. 2015. **58**, № 12. С. 1052.
 [2] Гурбатов С. Н., Дерябин М. С., Касьянов Д. А., Курин В. В. // Радиофизика. 2016. **59**, № 10. С. 887.
 [3] Гурбатов С. Н., Дерябин М. С., Касьянов Д. А., Курин В. В. // Акустический журнал. 2017. **63**, № 3. С. 235.

- [4] Гурбатов С. Н., Дерябин М. С., Касьянов Д. А., Курин В. В. // Радиофизика. 2018. **16**, № 7. С. 1.
 [5] Гурбатов С. Н., Дерябин М. С., Касьянов Д. А., Курин В. В. // Sound and Vibration. 2019. № 439. С. 208.

Experimental study of diffraction of shock acoustic waves at the edge of the screen

S. N. Gurbatov, M. S. Deryabin, D. A. Kasyanov, V. V. Kurin, A. V. Tyurina

¹ Department of Acoustics, Faculty of Radiophysics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

² Institute of Applied Physics RAS

E-mail: ^agurb@rf.unn.ru, ^bmmm1984@inbox.ru, ^cda_kasyanov@ipfran.ru,
^dkurin@rf.unn.ru, ^evanilch22@gmail.com

The paper presents the results of an experimental study of the diffraction of shock acoustic waves at the edge of the screen. Laboratory experiments were carried out in degassed distilled water under normal climatic conditions at a facility that provided positioning of the receiving-emitting system in three linear coordinates with an accuracy of no worse than 6 mkm. Piston transducers with operating frequencies of 1 and 2 MHz, with various diameters of apertures from 1 cm to 4 cm were used as emitters. The maximum amplitude of acoustic pressure at the aperture of the emitters was 1 MPa. The acoustic wave profile was recorded using a membrane hydrophone with an almost uniform sensitivity characteristic in the frequency band up to 40 MHz. As a result of the experiments, some features of the diffraction of intense acoustic beams were discovered. In particular, profiles of acoustic waves having a spectral characteristic with the law of harmonic decay substantially different from the case of unlimited space are recorded near the acoustic axis of the emitter. An additional extremum was observed in the transverse distributions of the amplitudes of harmonics with numbers higher than 7, related both to the diffraction of individual harmonics and to the ongoing nonlinear generation of multiple harmonics pump frequencies.

PACS: 43.25.+y

Keywords: diffraction, intense acoustic beams, shock waves.

Received 14 November 2019.

Сведения об авторах

1. Гурбатов Сергей Николаевич, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; e-mail: gurb@rf.unn.ru.
2. Курин Василий Викторович, канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель; e-mail: kurin@rf.unn.ru.
3. Касьянов Д.А., доктор физ.-мат. наук, доцент, зав. отделом; e-mail: da_kasyanov@ipfran.ru.
4. Дерябин Михаил Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, зав. сектором; e-mail: mmm1984@inbox.ru.
5. Тюрина Анастасия Валерьевна, магистр РФФ, e-mail: vanilch22@gmail.com.