

Экспериментальное исследование распространения интенсивных узкополосных шумовых пучков

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

¹Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского
Россия, 600950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

²Институт прикладной физики РАН
Россия, 603950, Нижний Новгород,
БОКС-120, ул. Ульянова, 46

(Статья поступила 06.12.2017; Подписана в печать 08.12.2017)

Экспериментально исследованы нелинейные эффекты, возникающие при распространении интенсивных узкополосных шумовых пучков. Специально созданная экспериментальная установка позволяет излучать в среду шумовые акустические сигналы с заданными характеристиками и регистрировать их по мере распространения в широком частотном диапазоне. Экспериментальная установка создана на базе автоматического акустического измерительного комплекса фирмы Precision Acoustics (Ultrasound Measurement System Control Centre), позволяющего позиционировать гидрофон и излучатель с абсолютной точностью не менее 6 мкм. Для регистрации акустических сигналов использовался мембранный PVDF-гидрофон, имеющий калибровку от производителя в диапазоне частот до 40 МГц. При этом неравномерность характеристики чувствительности в данном диапазоне частот не превышает 20%. Для излучения шумовых импульсов использовался излучатель Olympus, имеющий добротность около трёх. Рабочая частота излучателя 2 МГц. Характерный уровень акустического давления на апертуре излучателя составлял 1 МПа. В результате экспериментов показано, что форма спектра сигнала по мере распространения шумового импульса трансформируется к универсальной структуре.

PACS: 43.25.+y

УДК: 534.2

Ключевые слова: нелинейность, шум, акустический пучок, уравнение Бюргерса.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованию распространения интенсивного акустического шума достаточно велик, например, весьма актуальны исследования шумов, создаваемых двигателями современных самолетов в звуковом диапазоне частот [1, 2]. Описание распространения интенсивного шума обычно строится на решении уравнения Бюргерса, которое было предложено Бюргерсом как модельное уравнение гидродинамической турбулентности. Случайные поля, удовлетворяющие этому уравнению, принято называть турбулентностью Бюргерса и даже Burgulence [3], или в приложении к эволюции интенсивных акустических шумов — акустической турбулентностью. Исследованию статистических характеристик интенсивных акустических шумов и турбулентности Бюргерса посвящено большое число работ (см, например, библиографию в монографиях и обзорах [3, 4]). Из лабораторных экспериментов можно отметить работы по исследованию генерации гармоник шумовым квазимонохроматическим сигналом на начальной стадии [5] и по распространению интенсивных шумов в трубах [6, 7]. Исследования, представленные в данной работе, касаются распространения интен-

сивных ультразвуковых шумовых пучков в жидкости при больших числах Рейнольдса.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ШУМОВЫХ ПУЧКОВ

Экспериментальная установка (блок-схема представлена на рис. 1.а)) создавалась на базе измерительного комплекса фирмы Precision Acoustics (Ultrasound Measurement System Control Centre), включающего: ванну из оргстекла 1 с размерами 1х1х1 м, манипуляторы для гидрофона и излучателя, управляющий компьютер и осциллограф Agilent DSO-X 3034 2. Подробное описание этой установки дано в статье этих же авторов в данном сборнике докладов. В экспериментах использовался плоский пьезокерамический излучатель фирмы Olympus. Рабочая частота излучателя 2 МГц, характерный радиус апертуры 2 см. Добротность излучателя составляет не более 3-х. С помощью генератора создавался шумовой сигнал в широком диапазоне частот, в среду же излучался уже узкополосный шум, определяемый амплитудно-частотной характеристикой излучателя. Сигнал накачки контролировался с помощью осциллографа через измерительный пробник (Voltage probe Tektronix P6139B).

Принятый сигнал с гидрофона, подавался на предусилитель Power Supply 8 фирмы Precision Acoustics и предварительно анализировался осциллографом Agilent DSO-X 3034, а затем записывался на компьютер.

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

†E-mail: mmm1984@inbox.ru

‡E-mail: da_kasyanov@ipfran.ru

§E-mail: kurin@rf.unn.ru

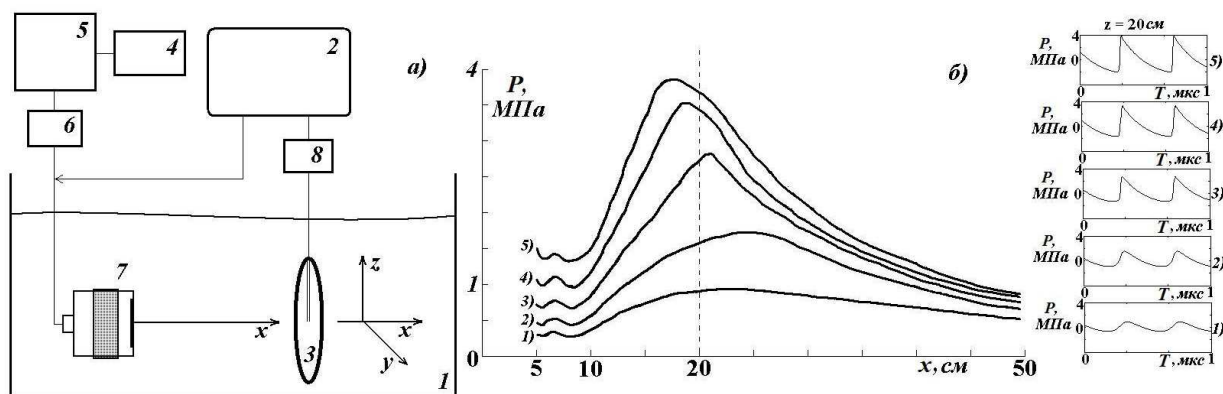


Рис. 1: а — Блок-схема экспериментальной установки. б — Амплитуды фронта сжатия акустической волны вдоль акустической оси x при пяти разных входных амплитудах на апертуре излучателя P_0 : 1 — 0.3 МПа; 2 — 0.4 МПа; 3 — 0.6 МПа; 4 — 0.8 МПа; 5 — 1 МПа

Измерения производились на акустической оси излучателя x . При измерениях гидрофон оставался неподвижным, а излучатель перемещался вдоль акустической оси. Автоматизированный комплекс позволяет проводить измерения структуры акустического поля детально. В экспериментах поле измерялось в диапазоне расстояний от начальной апертуры 50–500 мм.

Особенности параксиального распространения интенсивного акустического пучка демонстрируются на рис. 1, б). Первое, на что необходимо обратить внимание — это немонотонный характер поведения амплитуды фронта сжатия акустической волны вдоль акустической оси x . На рис. 1, б) приведены соответствующие распределения при пяти различных начальных амплитудах давления. Данные зависимости получены в режиме излучения радиоимпульсов с частотой заполнения 2 МГц.

Также зависимости, представленные на рис. 1, б, наглядно демонстрируют эффект насыщения амплитуды ударного фронта на больших дистанциях распространения. Последовательное увеличение амплитуды давления на начальной апертуре излучателя не приводит к пропорциональному приросту амплитуды ударного фронта на большом расстоянии от апертуры излучателя. Однако полного насыщения в данной экспериментальной ситуации не достигается из-за ограниченности чисел Рейнольдса и дистанции распространения.

Отметим ещё одно проявление совместного действия дифракции и нелинейности. Максимум фронта сжатия волны при увеличении давления на начальной апертуре смещается вначале от излучателя, а затем начинает двигаться к излучателю (рис. 1, б). Координата максимума фронта сжатия в интенсивном акустическом пучке определяется и акустическим числом Рейнольдса, и дифракционными свойствами излучателя. Для иллюстрации справа на рис. 1, б) приведены профили волны, зарегистрированные на расстоянии $x = 20$ см от апертуры излучателя, при различных амплитудах давления на начальной апертуре. Данное расстояние

соответствует последнему дифракционному максимуму в распределении поля, создаваемого используемым излучателем при его работе в линейном режиме. При незначительном проявлении нелинейных эффектов (случай 1) координата максимума фронта сжатия находится в области последнего дифракционного максимума. В случае 2 нелинейные эффекты уже приводят к образованию ударного фронта, и координата образования ударного фронта находится за последним дифракционным максимумом. К дистанции $x = 20$ см ударный фронт образуется только в случаях 3, 4 и 5, причём чем больше P_0 , тем ближе к начальной апертуре расположен максимум фронта сжатия, причём здесь также наблюдается «эффект насыщения».

Эксперимент по изучению эволюции интенсивного шума вдоль акустической оси был организован следующим образом. Цифровым генератором создавалась временная реализация белого шума. Данная реализация записывалась и подавалась на излучатель через цепи усиления отдельно для каждого пространственного положения системы излучатель — гидрофон.

На рис. 2, а) приведены характерные осциллограммы. На малых расстояниях от апертуры излучателя, ударные фронты в профиле шумовых пучков образовываться не успевают. К дистанции $x = 20$ см, ударные фронты формируются в профилях самых высокоамплитудных участков реализаций пучка. К дистанции распространения $x = 50$ см, ударные фронты сформировались на большинстве участков профиля шумового пучка, при этом видна тенденция к подавлению амплитудной модуляции, как и предсказывается теорией. Полного выравнивания амплитуд переколебаний в данной экспериментальной ситуации не происходит, так как необходимо достижение больших чисел Рейнольдса в пучке или больших расстояний, что используемая экспериментальная техника не позволяет.

Для исследования спектральных характеристик шумового сигнала в каждой рассматриваемой координате пространства записывалось 1000 осциллограмм дли-

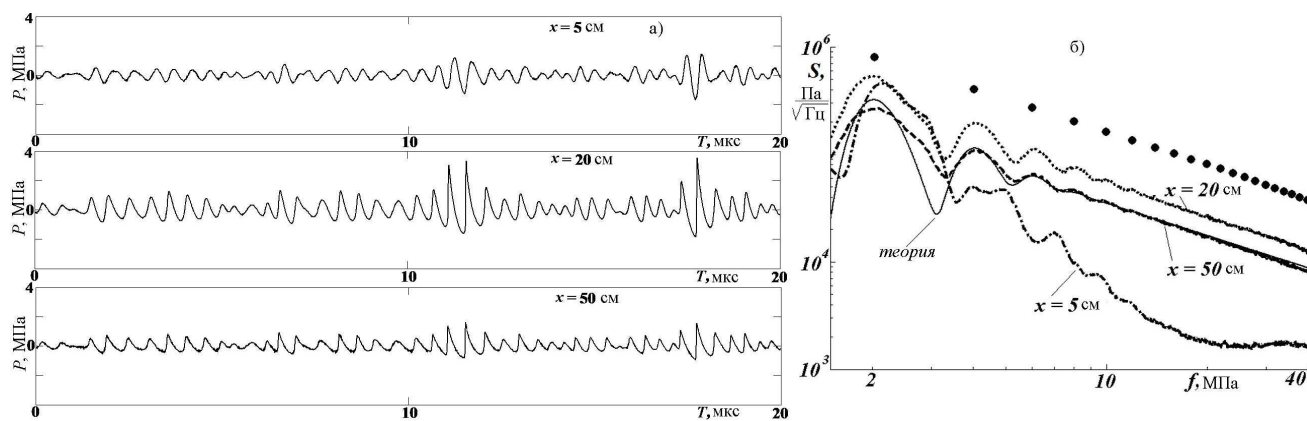


Рис. 2: а — Осциллограммы шумовых сигналов на расстоянии от излучателя $x = 5$ см, $x = 20$ см, $x = 50$ см. б — Спектры шумовых сигналов и амплитуды гармоник тонального сигнала на расстоянии от излучателя $x = 5$ см, $x = 20$ см, $x = 50$ см в двойном логарифмическом масштабе. Здесь же приведена сплошной линией теоретическая зависимость формы спектра полученная для плоской волны [7]

тельностью 20 мкс. От каждой осциллограммы брался спектр. Затем вычислялся усредненный спектр шумового сигнала в рассматриваемой точке пространства по всем реализациям.

На рис. 4 приведены спектры зарегистрированного шумового сигнала и для сравнения амплитуды гармоник тонального сигнала (2 МГц, $P_0 = 1$ МПа) на расстояниях от излучателя $x = 5$ см, $x = 20$ см, $x = 50$ см. Зависимости на рис. 2, б приведены в двойном логарифмическом масштабе, по оси абсцисс отложена частота, по оси ординат амплитуда спектра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, эксперимент показал, что форма спектра сигнала по мере распространения шумового импульса трансформируется к универсальной структуре. Спектр при этом, имеет зависимость амплитуды спектральной компоненты от частоты с законом спада на высоких частотах как частота в степени минус единица.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 14-12-00882.

- [1] Morfey C. L., Howell G. P. AIAA J. 1981. **19**. P. 986.
- [2] Gee K. L., Gabrielson T. B., Atchley A. A., Sparrow, V. W. AIAA J. 2005. **43**. P. 1398.
- [3] Бес J., Khanin K. Phys. Rep. 2007. **447**. P. 1.
- [4] Гурбатов С. Н., Руденко О. В., Саичев А. И. Волны и структуры в нелинейных средах без дисперсии. Приложения к нелинейной акустике. М.: Физматлит, 2008.
- [5] Pernet D. F., Payne R. C. J. Sound and Vib. 1971. **17**. P. 383.
- [6] Pestorius F. M., Blackstock D. T. Experimental and theoretical study of propagation of finite-amplitude noise in a pipe, in Finite-Amplitude Wave Effects in Fluids./ ed. by L. Bjorno. IPC Science and Technology Press, Ltd., Guildford, UK, 1973.
- [7] Bjorno, L., Gurbatov S. N. Sov. Phys. Acoust. 1985. **31**.
- [8] Gurbatov S. N., Shepelevich L. G. Radiophys Quantum Electron. 1978. **21**(11). P. 1131.

Experiment investigating on narrowband intense acoustic noise propagation

S. N. Gurbatov^{1,a}, M. S. Deryabin^{1,2,b}, D. A. Kasyanov^{2,c}, V. V. Kurin^{1,d}

¹Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, 600950, Russia

²Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

E-mail: ^aagurb@rf.unn.ru, ^bmmm1984@inbox.ru, ^cda_kasyanov@ipfran.ru, ^dkurin@rf.unn.ru

Nonlinear effects arising when narrowband noise acoustic beams propagate are experimentally studied. Special experimental setup allows radiating noise acoustic signals with specified characteristics and recording broad frequency range data as the signals propagate. The base of experimental setup is Ultrasound Measurement System Control Centre (Precision Acoustics) with the absolute accuracy positioning no more than 6 microns. Membrane PVDF hydrophone is used for acoustic field registration. The hydrophone is calibrated by manufacturer for frequency range up to 40 MHz with non-uniformity no more than 20%. Radiator Olympus with Q factor near 3 is used for radiating noise signals with carrier frequency 2 MHz. Typical acoustic pressure level at

initial aperture is 1 МПа. Experiments show transformation of signal spectrum to universal structure as the signal propagates. The law of spectrum falling in high frequency range is frequency in minus one power.

PACS: 43.25.+y

Keywords: nonlinearity, noise, acoustic beam, Burgers.

Received 06 December 2017.

Сведения об авторах

1. Гурбатов Сергей Николаевич — докт. физ.-мат. наук, зав. кафедрой, профессор; e-mail: gurb@rf.unn.ru.
 2. Дерябин Михаил Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, зав. сектором; e-mail: mmm1984@inbox.ru.
 3. Касьянов Дмитрий Альбертович — докт. физ.-мат. наук, зав. отделом, доцент; e-mail: da_kasyanov@ipfran.ru.
 4. Курин Василий Викторович — ст. преподаватель; e-mail: kurin@rf.unn.ru.
-