

Закрученные ультразвуковые пучки

М. Е. Терзи,* П. В. Юлдашев,† О. А. Сапожников‡

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

«Закрученные» волны — это волны, способные передавать вращающий момент небольшому препятствию. В настоящей работе для создания «закрученного» пучка используется специальный фазовый экран, который превращает исходный фазовый фронт в спиралевидный. Проведён эксперимент и моделирование в среде MATLAB.

PACS: 43.35

УДК: 534.29

Ключевые слова: ультразвук, закрученные пучки, интеграл Рэлея, радиационная сила.

Ультразвуковая волна переносит энергию, импульс, а некоторые пучки — и момент импульса. При поглощении или рассеивании такой пучок давит на препятствие (возникает так называемая радиационная сила) и передаёт вращающий момент. Это явление, например, находит применение в медицине: с помощью ультразвуковых «пинцетов» (по аналогии с оптическими пинцетами, которые используются уже давно [1]), можно захватить и направить частицы лекарства в нужном направлении в организме или дистанционно передвигать камни в почке. Настоящая работа акцентирует внимание на возможности вращения частиц «закрученным» ультразвуковым пучком, несущем момент импульса [2]. Для создания такого пучка используется специальный фазовый экран, который превращает исходный плоский фазовый фронт в спиралевидный.

торов увеличивались пропорционально номеру сектора в процессе оборота вокруг оси диска, причём так, чтобы при полном обороте фаза прошедшей волны увеличивалась на число, кратное 2π . Набег фазы возникал из-за разных значений скорости звука в воде и оргстекле (1500 и 2700 м/с, соответственно). Распределение акустического давления после прохождения фазовой пластины измерялось с помощью миниатюрного гидрофона, который перемещался по исследуемой области пространства с помощью системы позиционирования, управляемой компьютером.

Результаты измерений сравнивались с теоретическим расчётом. Для численного нахождения комплексной амплитуды p акустического давления гармонической волны вида $\sim e^{i\omega_0 t}$ использовался интеграл Рэлея [3]:

$$p = \frac{-i\omega_0\rho_0}{2\pi} \int dS \frac{V e^{ikR}}{R}, \quad (1)$$

где ρ_0 — плотность воды, R — расстояние от точки интегрирования до точки наблюдения, $k = \omega_0/c$, V — амплитуда нормальной компоненты колебательной скорости на поверхности источника. Влияние фазового экрана учитывается выбором чисто фазового множителя в выражении для скорости $V(r, \varphi) = V_0 e^{i\Phi(\varphi)}$, где (r, φ) — полярные координаты. Зависимость $\Phi(\varphi)$ выбиралась либо линейно нарастающей $\Phi(\varphi) = L\varphi$ (здесь L — «топологический заряд» закрученного пучка), либо кусочно-постоянной, в соответствии с описанным выше экспериментом, в котором фазовая пластина разбивалась на сектора постоянной толщины.

При численном моделировании сектора разбивались на кольца, а каждое из колец — на трапециевидные участки примерно одинаковой площади. При этом интеграл (1) заменялся суммой. Расчёт проводился с помощью программы, написанной на языке Фортран. Построение графиков и двумерных распределений параметров акустического поля проводилось в среде MATLAB.

На рис. 2 показан пример теоретически рассчитанного распределения амплитуды акустического давления на большом расстоянии от источника. Видно, что распределение имеет кольцеобразный вид, причём диа-

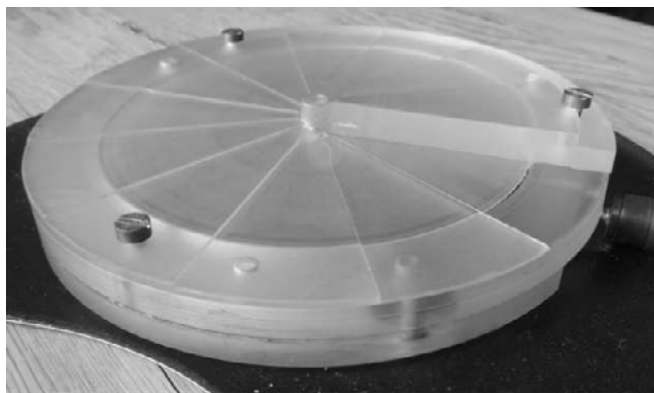


Рис. 1: Фазовый экран.

В проведённом эксперименте ультразвуковой пучок частоты 1 МГц создавался в воде с помощью пьезокерамического преобразователя диаметром 10 см. Этот пучок пропусклся через круглый диск из оргстекла диаметром 12,8 см, состоящий из 12-ти плоскопараллельных секторных участков (рис. 1). Толщины сек-

*E-mail: me.terzi@physics.msu.ru

†E-mail: petr@acs366.phys.msu.ru

‡E-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru

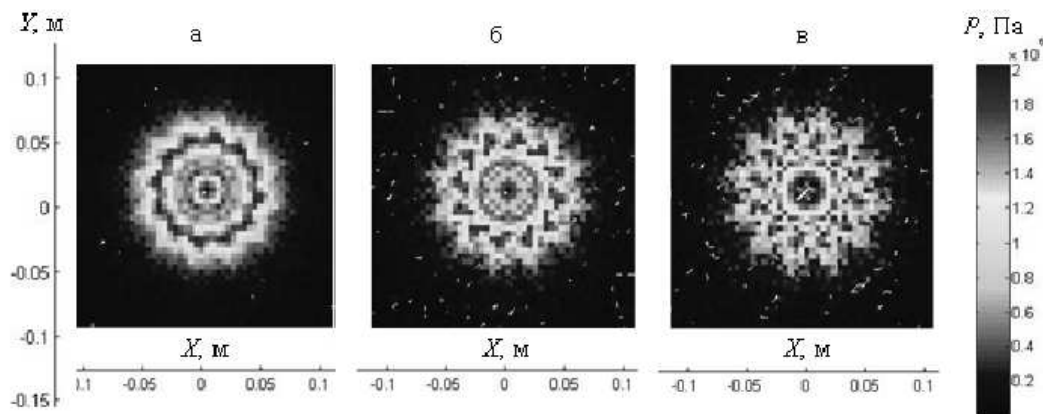


Рис. 2: Сравнение распределений амплитуды давления ультразвукового поля за фазовым экраном в плоскости поперечной оси пучка при разных значениях топологического заряда L : а) $L = 1$, б) $L = 2$, в) $L = 3$.

метр соответствующих колец повышенной интенсивности увеличивается с ростом величины топологического заряда L . Количество максимумов по кругу растёт, что соответствует увеличению количества закрученных фронтов. Поле на оси пучка всегда равно нулю, т. е. распределение имеет провал в центре пучка, причём размер провала тем больше, чем больше L . Это

указывает на возможность захвата малых частиц в поперечном направлении под действием акустической радиационной силы. В дальнейших исследованиях планируется экспериментально исследовать этот эффект.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-02-00426).

[1] *Watson A.* Science. **296**. P.2316. (2002).

[2] *Choe Y.* Applied Physics Letters. **99**, N 233704. P. 1. (2011).

[3] *Крылов В.В.* Основы теории излучения и рассеяния звука. (М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989).

Vortex ultrasonic beams

M. E. Terzi^a, P. V. Yuldashev^b, O. A. Sapozhnikov^c

*Department of acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia.*

E-mail: ^ame.terzi@physics.msu.ru, ^bpetr@acs366.phys.msu.ru, ^coleg@acs366.phys.msu.ru

Vortex beams are waves those are able to give torque to a small obstacle. In this research in order to create a vortex beam the special phase screen is used. Such screen turns originally plane wave in helical. The experiment is conducted and modeling in the program MATLAB is made.

PACS: 43.35

Keywords: ultrasound, vortex beams, Rayleigh integral, radiation force.

Received 27.07.2015.

Сведения об авторах

1. Терзи Марина Евгеньевна — студентка; тел.: (926)046-15-47, e-mail: me.terzi@physics.msu.ru.
2. Юлдашев Пётр Викторович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; e-mail: petr@acs366.phys.msu.ru.
3. Сапожников Олег Анатольевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, доцент; e-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru.