

## ЗАКРУЧЕННЫЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПУЧКИ

Терзи М.Е.<sup>\*</sup>, Юлдашев П.В., Сапожников О.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

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 «закрученными» ультразвуковым пучком, несущем момент импульса [2]. Для создания такого пучка используется специальный фазовый экран, который превращает исходный плоский фазовый фронт в спиралевидный.

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 12,9 см, состоящий из 12-ти плоскопараллельных секторных участков (рис. 1). Толщины секторов увеличивались пропорционально номеру сектора в процессе оборота вокруг оси диска, причём так, чтобы при полном обороте фаза прошедшей волны увеличивалась на число, кратное  $2\pi$ . 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.



Рис. 1. Фазовый экран

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

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

где  $\rho_0$  – 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  $(r, \varphi)$  – 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 Фор-

<sup>\*</sup> Победитель подсекции.



тран. Построение графиков и двумерных распределений параметров акустического поля проводилось в среде MATLAB.

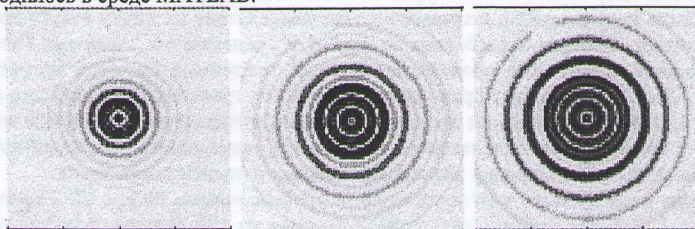


Рис. 2. Сравнение поперечных распределений амплитуды давления при различных значениях топологического заряда  $L$  (указан над рисунками)

На рис. 2 показан пример теоретически рассчитанного распределения амплитуды акустического давления на большом расстоянии от источника. Видно, что распределение имеет кольцеобразный вид, причём диаметр соответствующих колец повышенной интенсивности увеличивается с ростом величины топологического заряда  $L$ .

При ненулевом значении числа  $L$  (когда имеется закрученность) поле на оси пучка всегда равно нулю, т.е. распределение имеет провал в центре пучка. Это указывает на возможность захвата малых частиц в поперечном направлении под действием акустической радиационной силы. В дальнейших исследованиях планируется экспериментально исследовать этот эффект.

Работа поддержана при поддержке гранта РФФИ №14-02-00426.

E-mail: [me.terzi@physics.msu.ru](mailto:me.terzi@physics.msu.ru)

#### Литература

1. Watson A. New twist could pack photons with data. – Science, 2002, v. 296, pp. 2316-2317.
2. Choe Y., Kim J.W., Shung K.K., Kim E.S. Microparticle trapping in an ultrasonic Bessel beam. – Applied Physics Letters, 2011, v. 99, 233704.
3. Крылов В.В. Основы теории излучения и рассеяния звука. – Издательство Московского университета, 1988, стр.34.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МЕДИЦИНСКОМ ПРИЛОЖЕНИИ ОЧИЩЕНИЯ ПОЧКИ ОТ МЕЛКИХ ПОЧЕЧНЫХ КАМНЕЙ

Андрияхина Ю.С., Карзова М.М.

МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

В настоящее время быстро развивающимся направлением волновой физики является использование ультразвуковых волн в медицинских приложениях [1]. Широко используемой областью применения ультразвука является литотрипсия – процедура разрушения почечных камней мощными ударными импульсами [2]. При этом происходит дробление камня на миллиметровые фрагменты, которые самостоятельно выводятся из организма. Во многих случаях после проведения процедуры литотрипсии остается актуальной проблема отхождения мелких фрагментов почечных камней, остающихся в нижней части почки и приводящих к развитию рецидива мочекаменной болезни [3]. Несколько лет назад была предложена новая технология, заключающаяся в выталкивании из почки мелких почечных камней или осколков камней после процедуры литотрипсии путем воздействия на камень радиационной силой ультразвукового пучка [3]. Для толкания камней было предложено использовать стандартный диагностический ультразвуковой излучатель, работающий в нелинейном режиме. На данный момент ос-