СБОРНИК ТРУДОВ



XXXIV сессии

Российского акустического общества

14-18 февраля 2022, Москва

Сборник Трудов XXXIV сессии Российского акустического общества. – М., ГЕОС, 2022, 1236 с.

Всероссийская научная конференция «XXXIV сессия Российского акустического общества» с успехом состоялась в Москве в феврале 2022 года. На конференции были рассмотрены современные проблемы развития акустики, в частности в области физической акустики, нелинейной акустики, оптоакустика, акустики океана, геоакустики, акустических метаматериалов, архитектурной и строительной акустики, медицинской, атмосферной акустики, биоакустики, в акустике речи, ультразвуковых исследований, при распространении и дифракции волн, шумов и вибраций, а также акустические измерения и их стандартизация. В научную программу конференции были включены более 170 докладов и приняли участие более 140 ученых, которые представили свои доклады во всех областях акустики. В конференции приняли участие ученые и специалисты из более 40 научных учреждений, предприятий и университетов из более чем 15 городов России и Беларуси, соавторами докладов были ученые из Абхазии, Великобритании, США, Израиля.

Всероссийская научная конференция «XXXIV сессия Российского акустического общества» проходила В Москве, Акционерном обществе «Акустический институт имени Академика Н.Н. Андреева», в одном из ведущих научных институтов страны в области акустики и ее приложений.

Представленные в докладах результаты относятся как к фундаментальным, так и к прикладным исследованиям и техническим разработкам, связаны с развитием акустических технологий. Многие доклады представлены на конференции как ведущими российскими специалистами, так и значительная часть результатов получена с участием молодых ученых, около 60 докладов представлено на конференции молодыми специалистами и аспирантами. Активное участие научной молодежи в конференции указывает на перспективы дальнейшего развития представленных исследований и разработок.

В настоящий сборник трудов конференции включены 171 доклад, из них 7 пленарных. Разнообразие тематики и высокий научный уровень представленных материалов свидетельствуют о том, что работы отечественных специалистов в области акустики развиваются весьма успешно и по многим из направлений они сохраняют передовые позиции.

Материалы настоящего сборника будут полезны как для начинающих ученых, аспирантов и студентов соответствующих специальностей обучения, так и для широкого круга специалистов в области акустики и ее приложений.

Метод взвешивания твердотельного шара в жидкости для измерения действующей на него акустической радиационной силы

Л.М. Котельникова^{1,*a*}, Д.А. Николаев^{2,*b*}, А.А. Крохмаль^{1,*c*}, О.А. Сапожников^{1,*d*} ¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический

факультет, кафедра акустики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

² Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн. Россия, 119991, Москва, Ленинские

горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: ^{*a}</sup><u>kotelnikova.lm16@physics.msu.ru</u>, ^{<i>b*}<u>da.nikolaev@physics.msu.ru</u>, ^{*c*}aa.krokhmal@physics.msu.ru, ^{*d*}oleg@acs366.phys.msu.ru</sup>

Предложен и экспериментально реализован метод измерения акустической радиационной силы ультразвукового пучка мегагерцового диапазона частот, действующей на твердотельный шар миллиметрового размера в жидкости. Ультразвуковой пучок генерировался в емкости с водой вогнутым пьезокерамическим излучателем с центральной частотой около 1 МГц, фокусным расстоянием 70 мм и апертурой 100 мм. В качестве сферического рассеивателя использовался стеклянный шарик, который крепился в центре вспомогательного кольца большого диаметра с помощью системы натянутых тонких лесок. Кольцо посредством конструкции из жестких трубок, не касающихся стенок бассейна, опиралось на электронные весы. Это позволяло проводить измерения вертикальной компоненты радиационной силы, действующей на исследуемый шарик, с точностью 4 мг. Для подавления влияния гидродинамических потоков, инициируемых ультразвуком, над шариком натягивалась тонкая звукопрозрачная мембрана. Результаты экспериментальных измерений сравнивались с численными расчетами радиационной силы, основанными на методе разложения акустического пучка излучателя в угловой спектр, который находился из измерений акустической голограммы.

Ключевые слова: эксперимент, акустическая радиационная сила, фокусированный пучок, пространственный спектр.

УДК: 534.29

PACS: 43.25.Qp, 43.58.-e

DOI:10.34756/GEOS.2021.17.38195

Введение

При падении акустического пучка на рассеивающий или поглощающий объект происходит передача этому объекту импульса, в результате чего возникает явление акустической радиационной силы. Этот эффект имеет множество практических приложений, таких как дистанционная манипуляция объектами, акустическая левитация [1], калибровка ультразвуковых преобразователей [2, 3], возбуждение гидродинамических струй. В частности, в настоящее время в медицине развивается метод перемещения почечных камней и их фрагментов в теле человека под действием фокусированного ультразвука [4]. В этой связи представляет интерес количественное исследование способности ультразвука мегагерцового диапазона частот оказывать силовое воздействие на рассеиватели миллиметровых размеров, что требует развития методов прецизионного измерения малой величины радиационной силы.

Наиболее интересным и важным с точки зрения практических применений случаем является рассмотрение падения ограниченных акустических пучков на рассеиватель, размеры которого сравнимы или превышают длину волны. Для данного случая, используя метод углового спектра, были получены аналитические выражения для расчета радиационной силы, действующей со стороны произвольного пучка на сферический упругий рассеиватель произвольных размеров [5]. Указанная модель требует экспериментальной верификации. Ранее с этой целью были предложены методы экспериментального измерения поперечной компоненты радиационной силы [6], а также осевой компоненты силы [7, 8], действующей на шар миллиметровых размеров со стороны фокусированного пучка.

В данной работе предложен новый способ измерения акустической радиационной силы, оказываемой ультразвуковым пучком на упругий шар в жидкости. Создана оригинальная экспериментальная установка, в которой рассеиватель крепится в системе тонких натянутых лесок, опирающихся на жесткую конструкцию. Величина радиационной силы определяется по результатам взвешивания указанной конструкции на электронных весах по аналогии с методом измерения полной мощности акустического пучка, падающего на протяженный поглотитель [9].

1 Теоретическая модель

Численный расчет акустической радиационной силы проводился на основании теоретического подхода, описанного в работе [5]. Кратко приведем основные соотношения, используемые в настоящей работе.

Пусть на упругий шар радиуса *а* падает монохроматический волновой пучок. Осевая компонента радиационной силы, оказываемой пучком на рассеиватель, определяется следующим выражением:

$$F_{z} = -\frac{1}{4\pi^{2}\rho c^{2}k^{2}} \operatorname{Re}\left\{\sum_{n=0}^{\infty} \Psi_{n} \sum_{m=-n}^{n} B_{nm} H_{nm} H_{n+1,m}^{*}\right\}.$$
(1)

Секция ФА

Здесь c – скорость звука в иммерсионной жидкости (воде), ρ – плотность жидкости, $k = \omega/c = 2\pi f/c$ – волновое число, f – частота волны, Ψ_n – коэффициенты, определяющиеся упругими свойствами рассеивателя и среды, B_{nm} – известные числовые коэффициенты, $H_{nm} = \iint_{k_x^2 + k_y^2 \le k^2} dk_x dk_y S(k_x, k_y) Y_{nm}^*(\theta_k, \varphi_k)$ – коэффициенты, которые

полностью задают падающее поле, имеющее угловой спектр $S(k_x, k_y)$, $Y_{nm}(\theta, \varphi)$ – сферические гармоники, θ , φ – углы сферической системы координат (r, θ, φ) , угол $\theta = 0^{\circ}$ соответствует направлению распространения падающего пучка, начало координат совмещено с центром шара. Выражения для коэффициентов Ψ_n , B_{nm} и углов θ_k , φ_k приводятся в работе [5].

Для анализа удобно ввести безразмерную величину радиационной силы [8]

$$Y_z = \frac{F_z c}{W}.$$
 (2)

Здесь *W* – полная мощность акустического пучка, которая может быть рассчитана по известному угловому спектру:

$$W = \frac{1}{8\pi^{2}\rho c} \iint_{k_{x}^{2}+k_{y}^{2} \leq k^{2}} dk_{x} dk_{y} \sqrt{1 - \frac{k_{x}^{2} + k_{y}^{2}}{k^{2}}} \left| S(k_{x}, k_{y}) \right|^{2}.$$
 (3)

Угловой спектр давления $S(k_x, k_y)$ можно рассчитать по измеренной голограмме излучателя [10] и значению комплексной амплитуды электрического сигнала $U_{tr}(\omega)$, подаваемого на излучатель во время измерений радиационной силы:

$$S(k_x, k_y, \omega) = U_{tr}(\omega) \frac{S_U(k_x, k_y, \omega)}{M_0(\omega)D(k_x, k_y, \omega)},$$
$$S_U(k_x, k_y, \omega) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} dx dy U(x, y, \omega) e^{-ik_x x - ik_y y}.$$

где $U(x, y, \omega)$ – комплексная амплитуда электрического напряжения в точке пространства (x, y), полученная из измерения временной зависимости сигнала с помощью гидрофона. Данная величина нормирована на комплексную амплитуду электрического сигнала, подаваемого на излучатель во время измерения голограммы, на рассматриваемой частоте $\omega = 2\pi f$, $S_U(k_x, k_y, \omega)$ – пространственный спектр сигнала $U(x, y, \omega)$, $D(k_x, k_y, \omega)$ и $M_0(\omega)$ – диаграмма направленности и чувствительность гидрофона, соответственно.



2 Экспериментальная установка

Схема разработанной в данной работе экспериментальной установки для измерения акустической радиационной силы изображена на рис. 1.

В емкость с дегазированной водой помещался вогнутый пьезокерамический излучатель с фокусным расстоянием 70 мм и апертурой 100 мм, представляющий собой сферическую чашу. Голограмма данного излучателя была измерена ранее, по которой был определен угловой спектр, необходимый для расчета радиационной силы [8]. Излучатель был закреплен на системе позиционирования, позволявшей перемещать его вдоль трех взаимно перпендикулярных осей. Ось создаваемого акустического направлена пучка была вертикально вниз. С генератора (Agilent 33250A, США) через усилитель (ENI RF Power Amplifier) на излучатель подавался

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – емкость с водой, 2 – излучатель, 3 – система позиционирования, 4 – генератор, 5 – усилитель, 6 – сферический рассеиватель, 7– конструкция для крепления рассеивателя, 8 – весы, 9 – мембрана, 10 – поглотитель, 11 – осциллограф.

непрерывный гармонический сигнал амплитудой 5 В на частоте 1.072 МГц, соответствующей резонансу излучателя. На некотором расстоянии от излучателя на его акустической оси располагался сферический рассеиватель, который крепился в центре вспомогательного кольца большого диаметра с помощью системы натянутых рыболовных лесок малой толщины (диаметром 35.7 мкм). Кольцо посредством конструкции из жестких трубок, не касающихся стенок бассейна, опиралось на электронные весы VI-3mg (Acculab, США). Это позволяло проводить измерения вертикальной компоненты радиационной силы, действующей на исследуемый рассеиватель, с точностью 4 мг. Для подавления влияния гидродинамических потоков, инициируемых ультразвуком, над шариком помещалась звукопрозрачная мембрана, в роли которой выступала тонкая полиэтиленовая пленка толщиной менее 30 мкм. На дне бассейна располагался поглотитель с целью подавления отраженных волн НАМ-А

(Precision Acoustics, США). Сигнал, подаваемый на излучатель, измерялся с помощью осциллографа TDS5034B (Tektronix, США).

В качестве рассеивателя был использован стеклянный шар радиусом 3 мм и массой 300 мг, характеристики которого (плотность ρ_* , а также скорости продольных c_l и сдвиговых c_t упругих волн) были определены ранее [11]: $\rho_* = 2650$ кг/м³, $c_l = 5950$ м/с, $c_t = 3420$ м/с.

3 Результаты

Был проведен эксперимент для демонстрации работоспособности данного метода для измерений акустической радиационной силы. Величина радиационной силы определялась по разности показаний весов (m_{rad}) после и до подачи электрического сигнала с генератора на излучатель. Далее, используя формулу

$$Y_z^{exp} = \frac{m_{rad} gc}{W}, \tag{4}$$

результат взвешивания преобразовывался в величину безразмерной радиационной силы. Здесь $g = 9.81 \text{ м/c}^2$ – ускорение свободного падения, c = 1490 м/c – скорость звука в воде, W – полная мощность акустического пучка, которая рассчитывалась с помощью формулы (3) и для данных измерений составила W = 1.40 Вт. Измерения радиационной силы проводились путем перемещения излучателя относительно исследуемого стеклянного шарика вдоль акустической оси с шагом 0.5 мм. Измеренная величина радиационной силы лежала в диапазоне от 2 до 218 мг.



Рис. 2. Экспериментально измеренные и рассчитанные кривые зависимости безразмерной радиационной силы от положения на оси излучателя для стеклянного шара радиусом 3 мм.

На рис. 2 представлены результаты экспериментальных измерений силы, действующей на стеклянный шар радиусом 3 мм, в зависимости от расстояния от

излучателя на оси излучателя и соответствующий численный расчет радиационной силы. Экспериментальные значения рассчитаны по формуле (4), численные – по формулам (1) – (3). Теоретические значения хорошо совпадают с экспериментальными в постфокальной области (начиная с 80 мм), немного превышают экспериментальные значения в предфокальной области (на расстояниях до 67 мм), но в области фокуса видны существенные расхождения с теоретической кривой: появляются осцилляции, связанные с возникновением стоячих волн между излучателем и поверхностью рассеивателя, которые уже наблюдались ранее при измерениях радиационной силы другим методом [7, 8]. В этом случае период осцилляций силы должен составлять половину длины волны, т.е. около 0.7 мм. На представленном графике вследствие использования большого шага по координате данный период определить невозможно, но виден общий осцилляторный характер изменений силы, отражающий эффект возникновения стоячих волн.

В дальнейшем планируется минимизировать влияние возникающих стоячих волн, используя подход, описанный в работе [12]. Это позволит подавить эффект отражения ультразвука от поверхности пьезопреобразователя путем подбора электрического импеданса, на который нагружается указанный пьезопреобразователь.

Заключение

В настоящей работе предложен новый прецизионный метод измерения радиационной силы, оказываемой ультразвуковым акустической пучком на твердотельный сферический рассеиватель. Собрана оригинальная экспериментальная установка и представлены результаты измерений радиационной силы. Показана работоспособность лальнейшее предложенного Планируется метода. усовершенствование экспериментальной установки с целью подавления стоячих волн, образующихся между поверхностью рассеивателя и излучателем.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-02-00139 и стипендией Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Список литературы

- Ghanem M.A., Maxwell A.D., Wang Y.N., Cunitz B.W., Khokhlova V.A., Sapozhnikov O.A., Bailey M.R. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2020. 117, N 29. P. 16848.
- 2. Delchar T.A., Melvin R.J. // Meas. Sci. Technol. 1994. 5, N 12. P. 1533.
- 3. Tsysar S., Kreider W., Sapozhnikov O. // Proc. Mtgs. Acoust. 2013. 19. P. 055015.

- Harper J.D. Shah A., Cunitz B., Wang Y.-N., Paun M., Simon J., Lu W., Kaczkowski P., Bailey M. // J. Urol. 2016. 195, N 4. P. 956.
- 5. Sapozhnikov O.A., Bailey M.R. // J. Acoust. Soc. Am. 2013. 133, N 2. P. 661.
- Ghanem M.A., Maxwell A.D., Sapozhnikov O.A., Khokhlova V.A., Bailey M.R. // Phys. Rev. Applied. 2019. 12. P. 044076.
- 7. Karzova M., Nikolaeva A., Tsysar S., Khokhlova V., Sapozhnikov O. // Proc. Mtgs. Acoust. 2017. **32**, N 1. P. 045011.
- 8. Nikolaeva A., Karzova M., Tsysar S., Khokhlova V., Sapozhnikov O. // Proc. Mtgs. Acoust. 2019. **38**, N 1. P. 045009.
- Maruvada S., Harris G.R., Herman B.A., King R.L. // J. Acoust. Soc. Am. 2007. 121, N 3. P. 1434.
- 10. Sapozhnikov O.A., Tsysar S.A., Khokhlova V.A., and Kreider W. // J. Acoust. Soc. Am. 2015. **138**, N 3. P. 1515.
- 11. Котельникова Л.М., Николаев Д.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А. // Акуст. журн. 2021. **67**, № 4. С. 371.
- 12. Котельникова Л.М., Крохмаль А.А., Николаев Д.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. **86**, № 1. С. 90.

Сведения об авторах

- 1. Котельникова Любовь Михайловна студент; e-mail: kotelnikova.lm16@physics.msu.ru.
- Николаев Дмитрий Александрович аспирант; тел.: +7(495) 939-29-52, e-mail: da.nikolaev@physics.msu.ru.
- Крохмаль Алиса Александровна аспирант; тел.: +7(495) 939-29-52, e-mail: aa.krokhmal@physics.msu.ru.
- Сапожников Олег Анатольевич доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел.: +7(495) 939-29-52, e-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru.

назад к содержанию секции ФА

The method of weighting of a solid sphere in a liquid to measure the acoustic radiation force acting on it

L.M. Kotelnikova^{1,a}, D.A. Nikolaev^{2,b}, A.A. Krokhmal^{1,c}, O.A. Sapozhnikov^{1,d}

¹ Department of Acoustics, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

² Department of Photonics and Microwave Physics, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^{*a*}*kotelnikova.lm16@physics.msu.ru,* ^{*b*}*da.nikolaev@physics.msu.ru,* ^{*c*}*aa.krokhmal@physics.msu.ru,* ^{*d*}*oleg@acs366.phys.msu.ru*

A method for measuring the acoustic radiation force of an ultrasound beam in the megahertz frequency range acting on a mm-sized solid sphere in a liquid has been proposed and experimentally implemented. The ultrasound beam was generated in a water tank by a concave piezoceramic source with a central frequency of 1 MHz, a focal length of 70 mm, and an aperture of 100 mm. A glass bead was used as a spherical scatterer, which was fixed in the center of a large-diameter auxiliary ring using a system of stretched thin lines. The ring, by means of a construction of rigid tubes that did not touch the walls of the tank, rested on an electronic scale. This made possible to measure the vertical component of the radiation force acting on the spherical target under study with an accuracy of 4 mg. To suppress the influence of hydrodynamic flows initiated by ultrasound, a thin sound-transparent membrane was stretched above the target. The results of experimental measurements were compared with numerical calculations of the radiation force based on the method of decomposition of the acoustic beam into an angular spectrum, which was found from the acoustic hologram measurements.

Keywords: experiment, acoustic radiation force, focused beam, angular spectrum. PACS: 43.25.Qp, 43.58.–e *Received*

back to the content of the section