

УДК 532.529:534.222.1
DOI: 10.7868/S25000640260103

ФОКУСИРОВКА МИКРОННЫХ ЧАСТИЦ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ В ПОЛЕ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

© 2026 г. Л.А. Ткаченко¹, А.А. Никифоров¹

Аннотация. Численно исследована возможность фокусировки микронных и субмикронных частиц полистирола, взвешенных в воде, в закрытом прямоугольном микроканале под воздействием акустического течения и акустического радиационного давления. Переход от одного горизонтального полуволнового резонанса к двум ортогональным фундаментальным резонансам с фазовым сдвигом вызывает существенное разнообразие в картине акустического течения и влияет на динамику субмикронных частиц. В отличие от случая классического полуволнового прямоугольного резонатора одновременное возбуждение двух ортогональных резонансов создает поле скорости акустического течения, которое не противодействует первичной силе акустического излучения. Несмотря на то, что сила сопротивления Стокса, обусловленная акустическим течением, является доминирующей, фокусировка достигается за счет того, что сила акустического излучения вызывает небольшие смещения частиц от линий тока акустического течения, что заставляет частицы закручиваться по спирали в центр сечения микроканала. Установлено существенное понижение критического диаметра частицы, при котором происходит переход от движения частицы под действием силы акустического излучения к движению частицы под действием силы сопротивления акустического течения. Достигнута фокусировка субмикронных частиц в центре сечения прямоугольного микроканала, что невозможно для подобных частиц в классическом полуволновом прямоугольном резонаторе.

Ключевые слова: акустическое течение, резонансные колебания, фокусировка, микронные частицы, акустическая радиационная сила.

FOCUSING OF MICRON PARTICLES IN A RECTANGULAR CHANNEL IN A STANDING WAVE FIELD

L.A. Tkachenko¹, A.A. Nikiforov¹

Abstract. The possibility of focusing micron and submicron polystyrene particles suspended in water in a closed rectangular microchannel under the influence of acoustic streaming and acoustic radiation pressure is numerically investigated. It is shown that the transition from one horizontal half-wave resonance to two orthogonal fundamental resonances with a phase shift causes a significant diversity in the acoustic streaming pattern and affects the dynamics of submicron particles. In contrast to the case of a classical half-wave rectangular resonator, the simultaneous excitation of two orthogonal resonances creates an acoustic streaming velocity field that does not counteract the primary force of acoustic radiation. Despite the fact that the Stokes drag force due to acoustic streaming is dominant, focusing is achieved due to the fact that the acoustic radiation force causes small displacements of particles from the acoustic streaming streamlines, which causes the particles to spiral into the center of the microchannel cross-section. A significant decrease in the critical diameter of the particle is established, where the transition from the particle motion under the action of the acoustic radiation force to the particle motion under the action of the resistance force of the acoustic flow occurs. Focusing of submicron particles in the center of the cross-section of a rectangular microchannel is achieved, which is impossible for such particles in a classical half-wave rectangular resonator.

Keywords: acoustic streaming, resonant oscillations, focusing, micron particles, acoustic radiation force.

¹ Институт механики и машиностроения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» (Institute of Mechanics and Engineering of the Federal Research Center “Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Kazan, Russian Federation), Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31, e-mail: luda_tkachenko@inbox.ru, anikiforov1@yandex.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

1. Dark P.M., Dean P., Warhurst G. 2009. Bench-to-bedside review: the promise of rapid infection diagnosis during sepsis using polymerase chain reaction-based pathogen detection. *Critical Care*. 13(4): 217. doi: 10.1186/cc7886
2. Huber L.A., Pfaller K., Vietor I. 2003. Organelle proteomics: implications for subcellular fractionation in proteomics. *Circulation Research*. 92(9): 962–968. doi: 10.1161/01.RES.0000071748.48338.25
3. Warrick J., Casavant B., Frisk M., Beebe D. 2010. A microfluidic cell concentrator. *Analytical Chemistry*. 82(19): 8320–8326. doi: 10.1021/ac101866p
4. Wang L., Dandy D.S. 2017. High-throughput inertial focusing of micrometer- and sub-micrometer-sized particles separation. *Advanced Science*. 4(10): 1700153. doi: 10.1002/advs.201700153
5. Martorell S., Tortajada-Genaro L.A., Maquieira A. 2019. Magnetic concentration of allele-specific products from

- recombinase polymerase amplification. *Analytica Chimica Acta*. 1092: 49–56. doi: 10.1016/j.aca.2019.10.006
6. Zhang W., Li N., Lin L., Huang Q., Uchiyama K., Lin J.-M. 2020. Concentrating single cells in picoliter droplets for phospholipid profiling on a microfluidic system. *Small*. 16(9): e1903402. doi: 10.1002/smll.201903402
 7. Hwang H., Park J.-K. 2009. Rapid and selective concentration of microparticles in an optoelectrofluidic platform. *Lab on a Chip*. 9(2): 199–206. doi: 10.1039/b811740c
 8. Petersson F., Åberg L., Swärd-Nilsson A.M., Laurell T. 2007. Free flow acoustophoresis: microfluidic-based mode of particle and cell separation. *Analytical Chemistry*. 79(14): 5117–5123. doi: 10.1021/ac070444e
 9. Gupta S., Feke D.L., Manas-Zloczower I. 1995. Fractionation of mixed particulate solids according to compressibility using ultrasonic standing wave fields. *Chemical Engineering Science*. 50(20): 3275–3284. doi: 10.1016/0009-2509(95)00154-W
 10. Muller P.B., Barnkob R., Herring Jensen M.J., Bruus H. 2012. A numerical study of microparticle acoustophoresis driven by acoustic radiation forces and streaming-induced drag forces. *Lab on a Chip*. 12(22): 4617–4627. doi: 10.1039/c2lc40612h
 11. Mao Z., Li P., Wu M., Bachman H., Mesyngier N., Guo X., Liu S., Costanzo F., Huang T.J. 2017. Enriching nanoparticles via acoustofluidics. *ACS Nano*. 11(1): 603–612. doi: 10.1021/acsnano.6b06784
 12. Yang W., Liu P., Li Q. 2019. Discrete simulation of particle manipulation in micro-fluid with acoustic force. *Powder Technology*. 356: 618–627. doi: 10.1016/j.powtec.2019.08.037
 13. Li Z., Li P., Xu J., Shao W., Yang C., Cui Y. 2020. Hydrodynamic flow cytometer performance enhancement by two-dimensional acoustic focusing. *Biomedical Microdevices*. 22(2): 27. doi: 10.1007/s10544-020-00481-9
 14. Gerlt M.S., Paeckel A., Pavlic A., Rohner P., Poulidakos D., Dual J. 2022. Focusing of micrometer-sized metal particles enabled by reduced acoustic streaming via acoustic forces in a round glass capillary. *Physical Review Applied*. 17(1): 014043. doi: 10.1103/PhysRevApplied.17.014043
 15. Lei J., Zheng G., Cheng F., Li K., Huang Z. 2024. Acoustofluidics in an equilateral triangular channel. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 151(1): 111088. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2023.111088
 16. Wiklund M., Green R., Ohlin M. 2012. Acoustofluidics 14: Applications of acoustic streaming in microfluidic devices. *Lab on a Chip*. 12(14): 2438–2451. doi: 10.1039/c2lc40203c
 17. Antfolk M., Muller P.B., Augustsson P., Bruus H., Laurell T. 2012. Focusing of submicrometer particles and bacteria enabled by two-dimensional acoustophoresis. *Lab on a Chip*. 14(15): 2791–2799. doi: 10.1039/c4lc00202d
 18. Urbansky A., Olm F., Scheduling S., Laurell T., Lenshof A. 2019. Label-free separation of leukocyte subpopulations using high throughput multiplex acoustophoresis. *Lab on a Chip*. 19(8): 1406–1416. doi: 10.1039/C9LC00181F
 19. Nyborg W.L. 1965. 11 – Acoustic streaming. In: *Physical acoustics: principles and methods. Volume II, Part B: properties of polymers and nonlinear acoustics* New York, Academic Press: 265–331. doi: 10.1016/B978-0-12-395662-0.50015-1
 20. Köster D. 2007. Numerical simulation of acoustic streaming on surface acoustic wave-driven biochips. *SIAM Journal on Scientific Computing*. 29(6): 2352–2380. doi: 10.1137/060676623
 21. Settnes M., Bruus H. 2012. Forces acting on a small particle in an acoustical field in a viscous fluid. *Physical Review E*. 85: 016327. doi: 10.1103/PhysRevE.85.016327
 22. Barnkob R., Augustsson P., Laurell T., Bruus H. 2012. Acoustic radiation- and streaming-induced microparticle velocities determined by microparticle image velocimetry in an ultrasound symmetry plane. *Physical Review E*. 86: 056307. doi: 10.1103/PhysRevE.86.056307

Поступила 03.07.2025

Принята 04.12.2025