



Динамика воздушного пузырька на твердой поверхности при воздействии ультразвука

Кучинский М.О. *, Любимова Т.П. **, Рыбкин К.А. *, Садовникова А.Д. *, Галишевский В.А. *

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

**Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, Пермь

Введение

Поведение пузырька в жидкости под действием ультразвука (УЗ) активно изучается на протяжении последних десятилетий ввиду большого количества эффектов, возникающих как на поверхности пузырька, так и в объеме жидкости или вблизи твердой поверхности [1]. В акустическом поле ультразвуковой волны на воздушные пузырьки действуют силы Бьеркнеса, которые приводят к пульсациям поверхности пузырька (первичная сила) и его поступательному движению в пространстве (вторичная сила), что, в частности, приводит к коалесценции пузырьков и ультразвуковой дегазации жидкости [2].

Если пузырёк, который подвергается воздействию УЗ, находится вблизи твердой поверхности, то он может закрепиться на ней, в этом случае контактный угол будет зависеть как от характеристик колебаний пузырька, так и от степени шероховатости поверхности и ее структуры [3, 4].

В настоящей работе экспериментально исследуется динамика уединенного воздушного пузырька в дистиллированной воде вблизи и на твердых поверхностях различной степени смачиваемости, с возможным его закреплением и удержанием на твердой поверхности под действием УЗ.

Экспериментальная установка и методика обработки измерений

В экспериментах использовалась оргстеклянная кювета, имеющая форму параллелепипеда, с размерами $103 \times 103 \times 195$ мм³ (Рис. 1 — слева). В центральной части кюветы строго горизонтально закреплялись исследуемые пластины (5) из материалов с различной степенью гидрофильности (кварцевое стекло, акрил, тефлон). В нижней части кюветы располагался 28 кГц источник УЗ (2). Эксперименты проводились в дистиллированной воде при нормальных условиях. Пузырек размером около 1 мм создавался при помощи калиброванного стеклянного капилляра и шприцевого насоса.

Для регистрации изменения краевого угла смачивания поверхности использовались SSD камера Basler acA1920-155um (4) и коллимированный источник контрольного света Telecentric HP illuminator (3), оснащенный телецентрическими макрообъективами. С использованием высокоскоростной ка-

© Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН
© Институт проблем механики им А.Ю. Ишлинского РАН
© Кучинский Михаил Олегович, kat6chinsky@gmail.com
© Любимова Татьяна Петровна, lubimova@psu.ru
© Рыбкин Константин Анатольевич, k.rybkin@gmail.com
© Садовникова Анастасия Денисовна, anastasiia3006@mail.ru

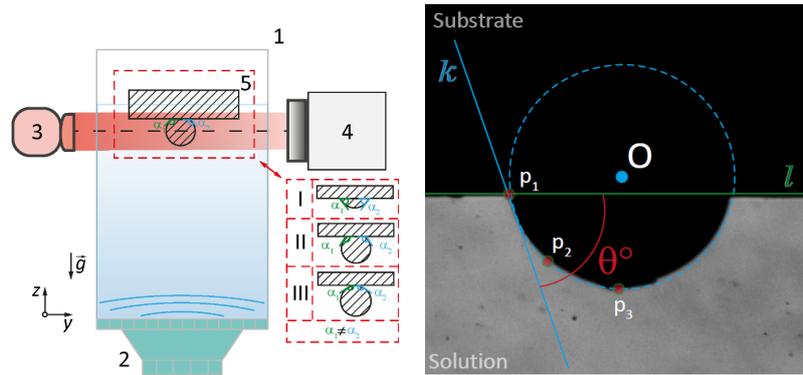


Рис. 1. Слева – схема экспериментальной установки; справа – изображение в процессе программной обработки

меры Basler A504кs была проведена серия коротких экспериментов для изучения характеристик колебаний пузырька и для их сравнения с теоретическими данными. Полученные в экспериментах фотографии обрабатывались с помощью алгоритма на Python, разработанного на основе тангенциального метода измерения краевого угла (Рис. 1 – справа). На первом этапе производилась бинаризация изображения, чтобы на изображении остался только контур пузырька на поверхности пластины, затем черному цвету присваивалось значение 0, белому – 1. Далее на картинке определялась линия пластины (l) и максимальное отклонение от нее, соответствующее верхней точке пузырька (p_3), после чего производился поиск крайней (p_1) и промежуточной (p_2) точек на границе пузырька. Далее по трем точкам записывались уравнения окружности, касательной в крайней точке пузырька. Затем из уравнения прямой, идущей вдоль пластины, и уравнения касательной (k) вычислялся краевой угол θ , °.

Результаты и выводы

Как показали эксперименты, проведенные с пластинами из кварцевого стекла (угол смачивания $130^\circ \div 145^\circ$, гидрофильная поверхность), после формирования пузырек не закрепляется на твер-

дой поверхности. Ультразвуковое воздействие приводит к колебаниям поверхности пузырька, его периодическому отскоку от твердой поверхности и дрейфу вдоль пластины в область низкого акустического давления, образовавшегося в результате изменения акустического импеданса на границе раздела сред и интерференции звуковых волн (Рис. 2).

При проведении экспериментов с пластинами из оргстекла (поверхность со средней степенью гидрофобности – краевой угол лежит в диапазоне $92^\circ \div 102^\circ$) и тефлона (гидрофобная поверхность с краевым углом $65^\circ \div 75^\circ$) зафиксировано, что пузырек также смещается в область низкого акустического давления, однако в этом случае отрыва от пластины (как в случае с гидрофильной поверхностью) не происходит, пузырек закрепляется и может дрейфовать по ней лишь на небольшие расстояния от места первоначального закрепления. Далее с использованием высокоскоростной камеры производилась регистрация параметров пузырька (контактный угол и высота). На Рис. 3 показаны колебания контактного угла на поверхности оргстекла при воздействии ультразвука. Результаты экспериментов по определению частоты собственных колебаний пузырька (Рис. 4) совпадают с теоретическим значением [5].

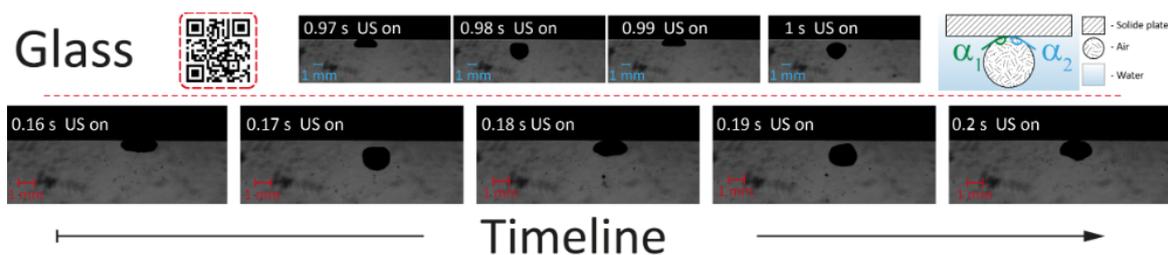


Рис. 2. Колебания пузырька на поверхности кварца под воздействием ультразвука с дальнейшим отрывом от пластины и деформацией поверхности пузырька в направлении распространения волны

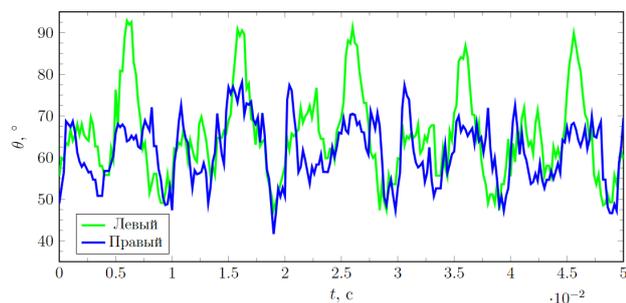


Рис. 3. Колебания контактного угла на оргстекле под воздействием ультразвука. Синяя кривая — правый краевой угол, зеленая — левый краевой угол

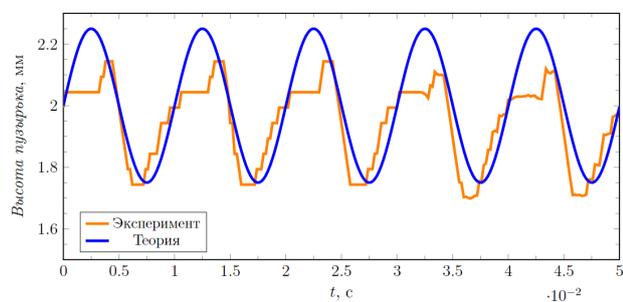


Рис. 4. Колебания высоты пузырька на тефлоне под воздействием УЗ, сопоставление экспериментальных (оранжевая кривая) и теоретических (синяя кривая) данных

Список литературы

- [1] Ding D., Bostwick J. B. Oscillations of a partially wetting bubble // *Journal of Fluid Mechanics*. 2022. Т. 945. С. А24.
- [2] Yoshida K., Fujikawa T., Watanabe Y. Experimental investigation on reversal of secondary Bjerknes force between two bubbles in ultrasonic standing wave // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2011. Т. 130. №. 1. С. 135–144.
- [3] Wang T. et al. Droplet Wetting Propagation on a Hybrid-Wettability Surface // *Langmuir*. 2021. Т. 37. №. 39. С. 11646–11656.
- [4] Brutin D. et al. Sessile drop in microgravity: creation, contact angle and interface // *Microgravity Science and Technology*. 2009. Т. 21. С. 67–76.
- [5] Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., Cherepanov A.A. Resonance oscillations of a drop (bubble) in a vibrating fluid // *Journal of Fluid Mechanics*. 2021. Т. 909. С. А18.