



## Экспериментальное исследование импульсного ультразвукового воздействия на воздушные пузырьки в жидкости

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

\* Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

\*\* Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, Пермь

### Введение

При движении пузырька в акустическом поле на него действуют силы Бьеркнеса, которые приводят к пульсациям его поверхности и поступательному движению, что может привести к процессу коалесценции [1]. Действие сил Бьеркнеса также может привести к процессу кластеризации пузырьков – образованию агломератов в узлах и пучностях стоячей волны. Добавление в раствор таких химических веществ как sodium dodecyl sulfate (SDS) и NaCl ингибирует процесс коалесценции: совместное воздействие ультразвука и поверхностно-активных веществ увеличивает электростатическое отталкивание и воздействует на оболочку пузырька, делая ее более плотной, что затрудняет процесс коалесценции и способствует образованию пузырьков кластеров [2].

Цель работы состоит в исследовании влияния УЗ и химических веществ на процесс генерации

пузырьков и в изучении эффектов, возникающих в такой системе при импульсном воздействии УЗ в присутствии растворенных реагентов.

### Экспериментальная установка и методика обработки измерений

Экспериментальная установка включала в себя кювету сложной геометрической формы, которая была изготовлена из акрила толщиной 3 мм (Рис. 1 – слева). Для генерации пузырьков применялись асимметрично смачиваемая мембрана, водяной насос, воздушный компрессор. Насос создавал сдвиговый поток жидкости, срывающий воздушные пузырьки с поверхности мембраны, таким образом происходила их генерация в правой части кюветы, после этого пузырьки попадали под действие УЗ (28 кГц) в центральной части и снова вместе с жидкостью – в магистраль насоса.

Пузырьки регистрировались с помощью двух камер: SSD камеры Basler acA1920-155um и высокоскоростной камеры Basler A504kc. С использованием высокоскоростной камеры Basler A504kc была проведена серия коротких экспериментов для более детального изучения эффектов, происходящих с пузырьками под действием УЗ в растворе. На ос-

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

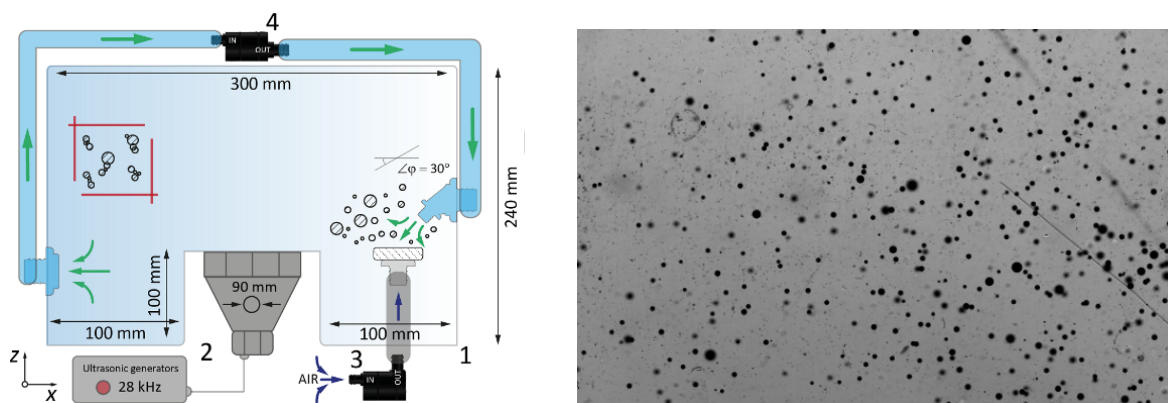


Рис. 1. Слева – схема экспериментальной установки; справа – изображение, полученное в процессе программной обработки

нове данных, полученных в ходе экспериментов, производилась компьютерная обработка изображений, по результатам которой строились гистограммы распределения пузырьков (Рис. 2).

## Результаты

Для регистрации размеров и количества генерируемых пузырьков с помощью SSD камеры были проведены эксперименты при различных концентрациях SDS без использования УЗ. На построенных в результате программной обработки гистограммах видно, что при увеличении концентрации от 0 до 3.5 ммоль/л наблюдается уменьшение среднего диаметра пузырьков при одновременном увеличении их количества (Рис. 2 – слева).

Затем была проведена серия экспериментов в растворе с фиксированной концентрацией SDS (1.5 ммоль/л) с использованием УЗ источника частотой 28 кГц (Рис. 2 – справа). После включения УЗ пузырьки объединяются, осаждаются на стен-

ках кюветы и совершают поступательное движение в направлении распространения УЗ волны. В момент отключения источника ультразвука происходит разрушение сформировавшихся структур (Рис. 3 – слева) с образованием большого количества микропузырьков. Если произвести повторное включение источника ультразвука, пузырьки заново группируются и движутся вверх под действием подъемной силы.

В результате эксперимента с использованием высокоскоростной камеры было выявлено, что под действием УЗ пузырьки в растворе образуют кластеры, которые движутся в направлении распространения волны. В момент отключения источника происходит радиальное разрушение образовавшихся агломератов вследствие прекращения действия сил Бьеркнеса; разрушившийся кластер приобретает форму кольца, соосного с направлением распространения УЗ волны, и продолжает движение (Рис. 3 – справа).

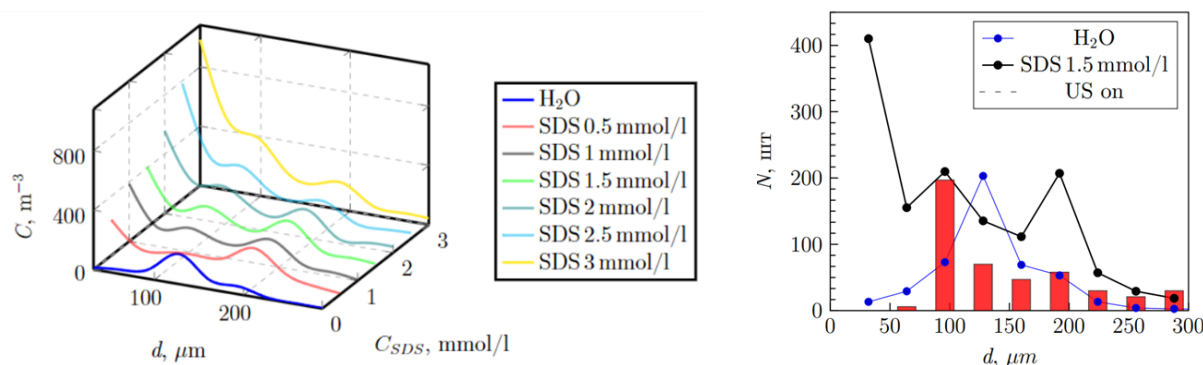


Рис. 2. Слева – распределение воздушных пузырьков по диаметру в растворах с различными концентрациями SDS [3]; справа – распределение воздушных пузырьков по диаметру при концентрации SDS 1.5 ммоль/л и включенном источнике УЗ

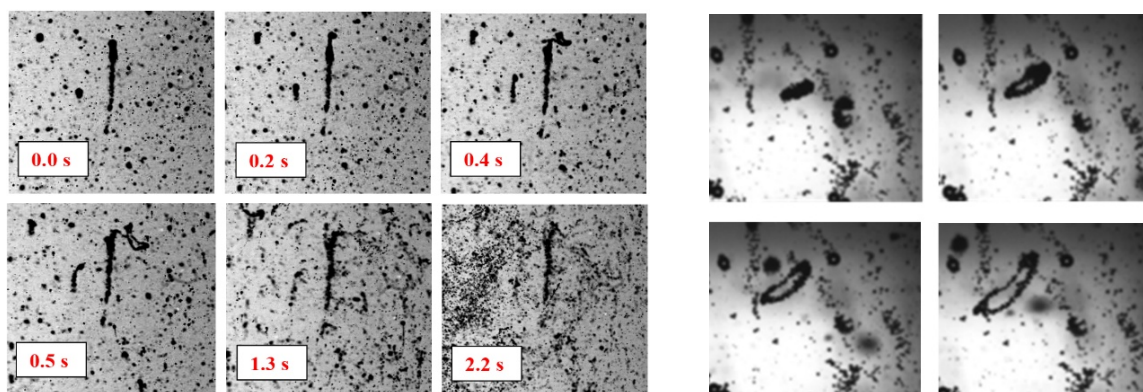


Рис. 3. Разрушение образовавшихся под действием УЗ кластеров при концентрации SDS 1.5 ммоль/л в момент отключения источника: слева – на стенке кюветы; справа – в объеме жидкости

В дальнейшем предполагается проведение экспериментов при импульсном воздействии УЗ с различными концентрациями SDS и NaCl, а также регистрация зон кавитационной активности и распределения акустического давления в рассматриваемой установке с использованием метода foil test.

### Список литературы

- [1] *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. V. 130(1), p. 135–144.
- [2] *Lee J. et al.* Influence of surface-active solutes on the coalescence, clustering, and fragmentation of acoustic bubbles confined in a microspace // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2007. V. 111(51), p. 19015–19023.
- [3] *Lyubimova T. et al.* Investigation of Generation and Dynamics of Microbubbles in the Solutions of Anionic Surfactant (SDS) // *Microgravity Science and Technology*. 2022. V. 34(4), p. 74.