

Экспериментальное исследование взаимодействия пузырьковых сред с акустическим полем

Саметов С.П.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа
Центр «Микро- и наномасштабная динамика дисперсных систем» БашГУ, Уфа

В работе детально описаны методика проведения экспериментальных измерений и результаты исследований по динамике взаимодействия ультразвуковых полей с пузырьковой жидкостью в замкнутом объеме с отражающими стенками и свободной поверхностью. Рассмотрено влияние различной концентрации пузырьков в жидкости на характер очистки среды от них. В пузырьковой жидкости скорость акустических волн существенно уменьшается, что приводит к перераспределению условий образования стоячих волн. Установлено, что увеличение концентрации приводит к более интенсивному вытеснению пузырьков воздуха ультразвуковым полем с образованием фронта вытеснения.

Ключевые слова: ультразвуковое поле, пузырьки, стоячие волны, очистка жидкости от пузырьков

1. Введение

Манипулирование газовыми пузырьками, находящимися в жидкости, с помощью акустического поля представляет большой интерес для множества технических и научных задач: перемешивание; образование напорного течения в микроканалах; перенаправление движения частиц; изменение оптических свойств в микропотоках жидкостей; образование микроторов, градиента концентрации веществ; перемещение микрочастиц [1,2]. При самоорганизации множества пузырьков в ультразвуковом поле интенсивностью ниже кавитационного порога обнаруживается выталкивание пузырьков воздуха в воде от источника поля независимо от положения пузырька в пространстве [3]. При этом возникает область, практически очищенная от пузырьков, в которой распределение поля давления постоянно меняется с движением фронта пузырьков, что формирует двустороннее взаимодействие системы «пузырьки–поле». Данный эффект открывает потенциальные методы управления множеством пузырьков посредством ультразвукового поля.

2. Экспериментальная установка с ультразвуковым излучателем и гидрофоном

Эксперимент реализован на основе существующей экспериментальной установки для исследований пузырьковых жидкостей в акустических полях, использующей высокоскоростную съемку и визуализацию (рис. 1). Экспериментальная установка состоит из тестовой ячейки, собранной из прозрачного оргстекла толщиной 5 мм и размерами 30 × 30 × 30 мм. Для лучшего склеивания стеклокрая отшлифованы, а для их склейки используется дихлорэтан. Ко дну ячейки приклеен акустический излучатель — дисковый пьезокерамический элемент марки PZ-SMD28T21F1000R (STEMiNC) с резонансной частотой 1 МГц, на который подается переменное напряжение с генератора сигналов WFG 33522A (Agilent Technologies) и усиливается по амплитуде с помощью усилителя сигналов AG 1012 (T&C Power Conversion). Для измерения распределения поля в тестовой ячейке используются игольчатый гидрофон HNR-1000 (Onda) и осциллограф HRO 66Zi (LeCroy). Визуализация динамики пузырьков в акустическом поле осуществляется с помощью высокоскоростной видеокамеры FASTCAM SA5 (Photron) с частотой кадров до 2000 кадров в секунду с разре-

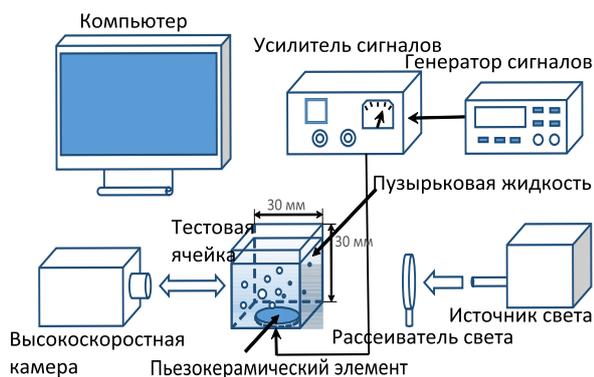


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследований динамики пузырьков в акустическом поле

шением 1024×1024 пикселей. Камера оснащена объективом для макросъемки Micro-Nikkor 60mm f/2.8D (Nikon), что позволяет достичь разрешения порядка 30 мкм/пиксель. Для оценок распределения по размерам концентрации пузырьков используются стеклянная кювета с внутренними размерами $17 \times 37 \times 1$ мм и длиннофокусный микроскоп K2/SC (Infinity Photo-Optical Company) с цифровой камерой INFINITY2-5C (Lumenera) с разрешением 2048×2048 пикселей, что обеспечивает разрешение порядка 2 мкм/пиксель.

При наложении синусоидального напряжения на пьезокерамический элемент в тестовой ячейке, заполненной жидкостью, устанавливается определенное акустическое поле. Действие пьезоэлемента основано на обратном пьезоэлектрическом эффекте: возникновение механических деформаций под действием электрического поля. При погружении игольчатого гидрофона в объем жидкости в тестовой ячейке проводится измерение акустического поля. Принцип действия гидрофона основан на прямом пьезоэлектрическом эффекте пьезокерамических материалов: при воздействии звукового давления на поверхность пьезокерамического элемента на его электродах возникает электрическое напряжение, пропорциональное действующему давлению. Показания электрического напряжения отображаются на экране осциллографа в виде графика зависимости амплитуды колебаний в милливольтках от времени сигнала.

3. Акустическое поле в ячейке, заполненной водой

Измерение поля давлений проводится в жидкости, свободной от пузырьков, чтобы избежать повреждения гидрофона осциллирующими пузырьками, оседающими на чувствительный элемент гидро-

фона. Для удобства обработки данных сигнал с генератора сигналов и регистрируемый осциллографом/гидрофоном синхронизированы по времени.

При измерении акустического поля в экспериментальной ячейке гидрофон фиксируется на ручном столике поступательного перемещения (THORLABS), позволяющего перемещать гидрофон в трех плоскостях XYZ с точностью до 0,5 мм. В работе измерение поля проводится только в плоскости XZ , образуя срез вдоль оси Y . Отмеряя точки на одинаковом расстоянии 2 мм вдоль оси X и 1 мм вдоль оси Z , подается напряжение с генератора сигналов длительностью не более 20 периодов, и амплитуда давления регистрируется гидрофоном после пересчета милливольт в килопаскалях. Акустическое поле измерено в области 27×20 мм, при этом минимальная точка по оси Z равна 1 мм, чтобы не повредить гидрофон (рис. 2).

4. Дисперсный состав пузырьковой жидкости

В эксперименте приготовлены несколько образцов пузырьковой жидкости концентрацией 0,002–0,12%. Средние размеры пузырьков в данных смесях варьируются от 6 до 10 мкм в результате метода получения пузырьковой жидкости различной концентрации, заключающегося в ожидании момента всплытия некоторой части пузырьков для получения меньшей концентрации, чем в самом начале приготовления пузырьковой смеси. Пузырьки большего размера всплывают быстрее и в среде остаются пузырьки меньшего размера.

Техника оценки распределения по размерам

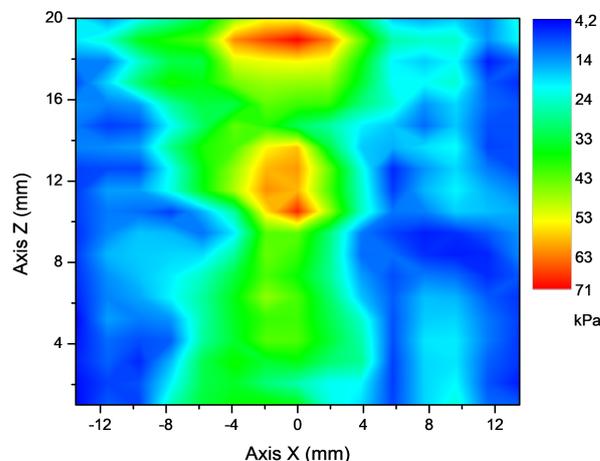
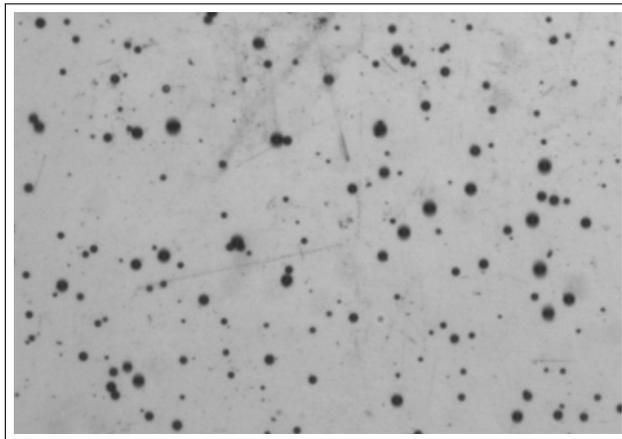
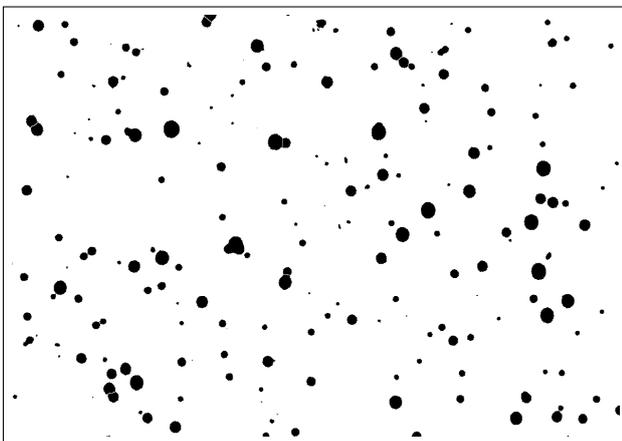


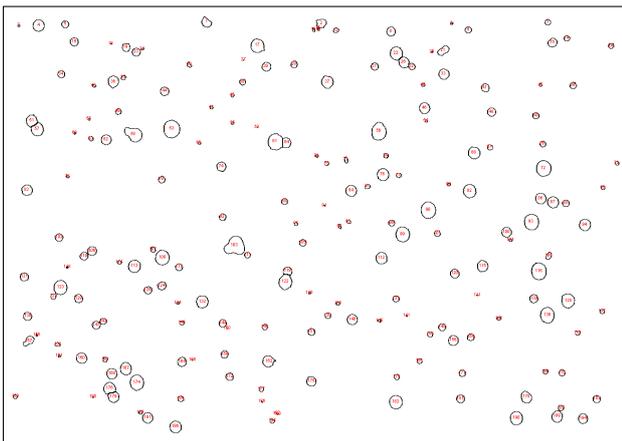
Рис. 2. Распределение давления в тестовой ячейке, заполненной водой, в ультразвуковом поле частотой 150 кГц



(а)



(б)



(в)

Рис. 3. Этапы цифровой обработки размеров пузырьков: а) фотография пузырьковой жидкости, б) бинаризованное изображение, в) результат аппроксимации пузырьков эллипсами (цифры внутри отмечены порядковые номера эллипсов)

и концентрации пузырьков основывается на фотосъемке пузырьковой среды в отдельной кювете и цифровой обработке полученных изображений с помощью программы свободного доступа ImageJ. Пользователем в программе определяются контуры объектов и аппроксимируются с помощью эллипсов, у которых определяются такие параметры, как количество объектов, позиция, длина большой и малой полуоси обработанных эллипсов. Первый шаг обработки фотоизображений — нахождение порогового значения уровня серого цвета. Для этого изображение бинаризуется и, после установки некоторого порогового значения уровня серого, исходное изображение сравнивается с бинарным так, чтобы черно-белое изображение совпадало с цветным (рис. 3(а),(б)). По контурам пузырьков программа аппроксимирует их эллипсами, определяются значения большой и малой полуоси и положение пузырьков (рис. 3(в)). В случае, когда эллиптичность принимает высокое значение, это расценивается как группа из нескольких близко расположенных пузырьков. Поэтому эллипсы с отношением большой к меньшей полуоси больше чем 1,2, отсеиваются. Также отсеиваются эллипсы, соответствующие шуму, у которых большая полуось меньше двух пикселей.

Радиус пузырьков R_{bub} рассчитывается как $R_{bub} = \sqrt{ab}/2$, где a и b — большая и малая оси эллипса. Построив гистограмму распределения, определяется среднее значение радиуса пузырьков, из гистограммы также находится общее число пузырьков, захваченное в фокальной плоскости микроскопа.

Для определения концентрации пузырьков ищется отношение объема всех пузырьков к общему объему газовой эмульсии. Суммируя объем каждого пузырька $V_{bub} = \frac{4\pi}{3}R_{bub}^3$, определяется общий объем пузырьков, показанных на фотоснимке рис. 3, равный $6,29 \cdot 10^6$ мкм³. Учитывая глубину резкости камеры 1 мм, разрешение камеры 1 мкм ≈ 2 пикселя и количество пикселей изображения, можно определить объем смеси на $V_{mixt} = (1280 \cdot 2)(1024 \cdot 2) \cdot 1000 = 5,24 \cdot 10^9$ мкм³. Принимая однородность распределения пузырьков во всем объеме тестовой ячейки, концентрация пузырьков будет равна $\varphi = (6,29 \cdot 10^6)/(5,24 \cdot 10^9) = 0,12\%$.

Фотографии пузырьковой жидкости и графики распределения размеров пузырьков для концентраций от 0,002% до 0,12% представлены на рис. 4. Среднее значение радиуса микропузырьков в диапазоне концентраций 0,002 ÷ 0,02% равно 6 мкм, в диапазоне 0,04 ÷ 0,12% — средний радиус пузырьков равен 10 мкм.

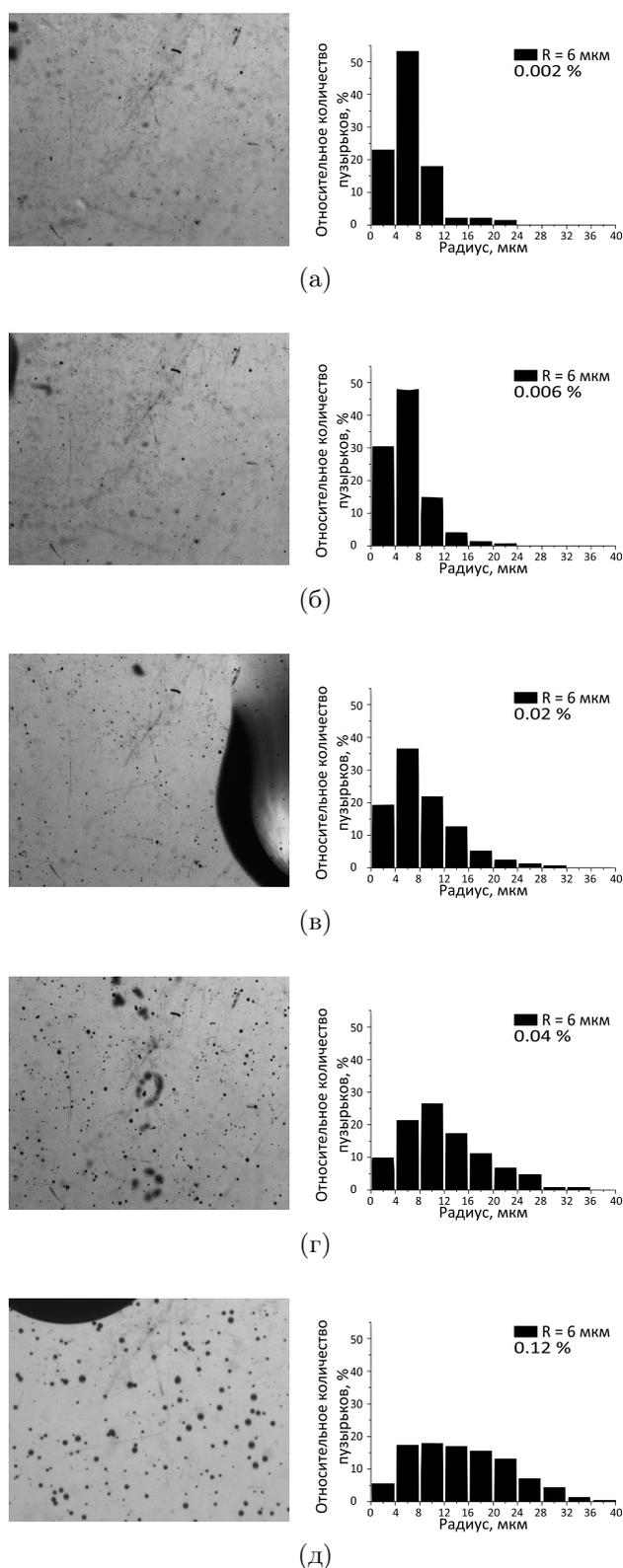


Рис. 4. Фотографии пузырьковой жидкости различной концентрации и соответствующее распределение по размерам пузырьков: а) 0,002%; б) 0,006%; в) 0,02%; г) 0,04%; д) 0,12%

5. Влияние акустического излучения на динамику пузырьков

В эксперименте высота пузырьковой жидкости в тестовой ячейке устанавливается равной 20 мм, при частоте ультразвукового поля 150 кГц в ячейке укладывается две длины волны. При концентрации пузырьков 0,002% и 0,006% пузырьковая среда весьма разрежена и при включении поля 150 кГц пузырьки уже на 0,1 секунде начинают группироваться в кластеры в пучностях и узлах стоячей волны (рис. 5(а),(б)). В тестовой ячейке наблюдаются сгруппированные вблизи горизонтальных линий пузырьковые кластеры. Примечательно, что при концентрации пузырьков 0,02% в момент включения поля пузырьки начинают перемещаться от источника поля, образуя область, практически чистую от пузырьков (рис. 5(в)). При этом образуется округлый фронт пузырьков, в котором концентрация выше, чем в остальной части пузырьковой жидкости.

Примерно за 500 миллисекунд фронт пузырьков достигает поверхности жидкости в ячейке (20 мм). При этом часть пузырьков все же остается в ячейке, пузырьки вытесняются не полностью. В момент достижения фронтом из вытесняемых пузырьков поверхности воды, не вытесненная часть пузырьков начинает перераспределяться по пучностям стоячих волн.

В пузырьковых средах с концентрацией 0,04% и 0,12% отчетливо наблюдается фронт пузырьков, движение которого аналогично описанному выше (рис. 5(г),(д)). Ультразвуковое поле вытесняет пузырьки воздуха от источника поля с образованием пузырькового фронта и практически свободной от пузырьков области. Известно, что увеличение концентрации пузырьков приводит к уменьшению скорости распространения ультразвуковых волн и соответственно уменьшению длины волны λ при данной частоте. По формуле Вуда [4, 5] для гомогенной смеси можно рассчитать скорости акустических волн в воде с пузырьками при их различных объёмных концентрациях. В воде при частоте 150 кГц — $\lambda = 10$ мм, при концентрации 0,02% — $\lambda = 5$ мм, а при концентрации 0,12% — $\lambda = 2,2$ мм. Это означает, что положение пучностей и узлов стоячих волн после начала излучения вместе с перемещением пузырьков также значительно смещаются, что, наряду с деформацией пузырьков в акустическом поле, приводит к динамическому изменению картины их распределения в объёме.

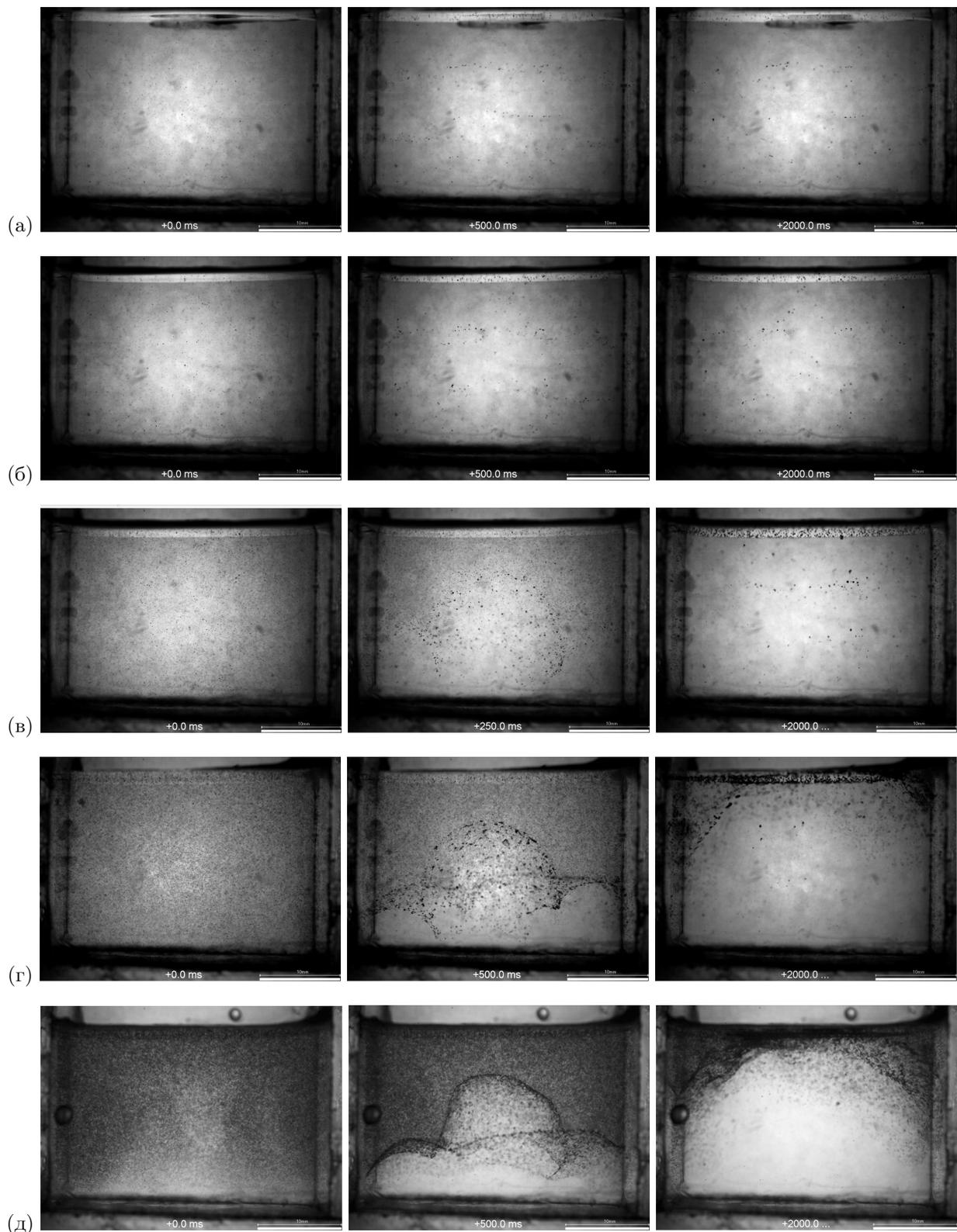


Рис. 5. Распределение пузырьков воздуха концентрацией 0,002% (а); 0,006% (б); 0,04% (в); 0,06% (г) и 0,12% (д) в тестовой ячейке в ультразвуковом поле частотой 150 кГц

6. Заключение

В эксперименте наблюдаются: а) режимы группирования пузырьков в акустическом поле, в которых пузырьки воздуха движутся к пучностям давления, образуя кластеры пузырьков; б) режим акустически индуцированной прозрачности, при котором пузырьки отбрасываются от акустического источника, образуя область жидкости, практически свободной от пузырьков; в) комбинированные режимы.

Список литературы

- [1] Huang P.H., Ian Laapsley M., Akmed D., Chen Y., Wang L., Jun Huang T. A single-layer, planar, optofluidic switch powered by acoustically driven, oscillating microbubbles // *Applied physics letters*. 2012. Т. 101, №. 14. С. 141101.
- [2] Ahmed D., Chan C.Y., Lin S.C.S., Muddana H. S., Nama N., Benkovic S.J., Huang T.J. Tunable, pulsatile chemical gradient generation via acoustically driven oscillating bubbles // *Lab on a Chip*. 2013. Т. 13, №. 3. С. 328–331.
- [3] Gumerov N.A., Akhatov I.S., Ohl C.D., Sametov S.P., Khazimullin M.V., Gonzalez-Avila S.R. Robust acoustic wave manipulation of bubbly liquids // *Applied physics letters*. 2016 – Т. 108. – №. 13. – С. 134102.
- [4] Агишева У.О., Болотнова Р.Х., Бузина В.А., Галимзянов М.Н. Параметрический анализ режимов ударно-волнового воздействия на газожидкостные среды // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2013. № 2. С. 15–28.
- [5] Уоллис Г.Б. Одномерные двухфазные течения // М.: Мир, 1972. 440 с.

Experimental study of interaction of bubble media with acoustic field

Sametov S.P.

Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa
Center for Micro- and Nanoscale Dynamics of Dispersed Systems, Bashkir State University, Ufa

In the paper, the procedure for performing experimental measurements and the results of studies on the dynamics of interaction of ultrasonic fields with a bubble liquid in a closed volume with reflecting walls and a free surface were detailed description. The influence of different concentrations of bubbles in the liquid on the nature of the purification of the medium from them is considered. In a bubble liquid, the velocity of acoustic waves decreases substantially, which leads to a redistribution of the conditions for the formation of standing waves. It was found that an increase in concentration leads to a more intensive displacement of air bubbles by an ultrasonic field with forming of a displacement front.

Keywords: ultrasound field, bubbles, standing waves, clearing

