

УДК 534-143; 534.232; 532.5.013
PACS 43.25.Nm, 47.80.Cb, 47.55.pb

Эксперименты по ультразвуковому разделению модельной водно-масляной эмульсии

Н. В. Козлов*, М. О. Денисова, А. И. Мизёв

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

*kozlov.n@icmm.ru

Экспериментально изучается динамика водно-масляных эмульсий в поле стоячей ультразвуковой (УЗ) волны. В экспериментах применяется ячейка-резонатор с прозрачными стенками. УЗ излучатель установлен в вертикальной стенке ячейки, его ось излучения направлена горизонтально, поперёк рабочего слоя. Проводится фото-видеорегистрация изображений слоя жидкости в проходящем свете с их последующей цифровой обработкой. Рабочие жидкости изготавливаются на основе силиконовых масел, а в качестве дисперсной фазы выступает вода. УЗ волна приводит к перераспределению жидкостей, которое удаётся различить по изменению картин яркости света, проходящего через рабочий слой. УЗ колебания вызывают кавитацию в объёме жидкости, а также акустические течения (в первую очередь «кварцевый ветер»), которые становятся заметны при сравнительно высокой интенсивности УЗ воздействия. Эксперименты показывают, что интегральная яркость изображений изменяется с интенсивностью УЗ воздействия немонотонно. Характер этой зависимости коррелирует с проявлением акустических течений и согласуется с результатами других авторов.

Ключевые слова: ультразвуковые колебания; акустический резонатор; ультразвуковая деэмульгация; акустические течения; кавитация

Поступила в редакцию 03.05.2023; после рецензии 11.06.2023; принята к опубликованию 15.06.2023

Experiments on ultrasonic separation of a model water-in-oil emulsion

N. V. Kozlov*, M. O. Denisova, A. I. Mizev

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

*kozlov.n@icmm.ru

The dynamics of model water-in-oil emulsions based on PMS-5 and PMS-100 silicone oils in the field of a standing ultrasonic wave is studied experimentally. In the experiments, a resonator cell with transparent walls is used. The ultrasonic transducer is installed in the cell's vertical wall; its radiation axis is directed horizontally, across the working layer. Experiments are performed at an ultrasonic exposure frequency of ~ 80 kHz and a dispersed phase concentration of 5%. Photo-video recording of the images of the liquid layer in transmitted light is carried out, with their subsequent digital processing. The brightness levels of the patterns of the working fluid layer in the transmitted scattered light are measured. An ultrasonic wave leads to a redistribution of the liquids, which can be distinguished by a change in the brightness patterns of the light passing through the working layer. This is evidence of ultrasonic separation due to acoustophoresis. Two main effects caused by ultrasonic action and preventing the separation of the emulsions are experimentally demonstrated. Ultrasonic oscillations cause cavitation in the liquid volume and also acoustic streaming (primarily the 'quartz wind'), which become noticeable at a relatively high intensity of ultrasonic exposure. Experiments show that the integral brightness of images varies non-

monotonically with change in the intensity of ultrasonic exposure. The nature of this dependence correlates with the manifestation of acoustic streaming and is consistent with the results of other authors.

Keywords: ultrasonic oscillations; acoustic resonator; ultrasonic demulsification; acoustic streaming; cavitation

Received 03 May 2023; revised 11 June 2023; accepted 15 June 2023

doi: 10.17072/1994-3598-2023-2-69-80

1. Введение

В современной промышленности весьма широко применяется ультразвуковое (УЗ) воздействие на жидкости. Оно позволяет обеспечить как создание эмульсий [1], так и их разделение [2]. Одной из сфер применения является разделение водно-масляных эмульсий, современный обзор литературы для которого дан Luo et al. [3]. Как показано, эффективным и распространённым способом воздействия являются стоячие УЗ волны, которые вызывают несколько физических эффектов.

Существуют первичная и вторичная акустические силы. Первая вызывает осреднённое движение капель дисперсной фазы на фоне колебательного движения и приводит к аккумуляции их в областях с наименьшей потенциальной энергией [4]. Направление движения капель определяется отношением плотностей фаз и скоростей звука в них [3, 5]. По мере сближения капель между ними начинает действовать вторичная акустическая сила, вызванная их колебаниями по отношению к окружающей дисперсионной среде. Это приводит к взаимному отталкиванию капель, колеблющихся вдоль общей оси, и взаимному притяжению, если ось, соединяющая центры капель, перпендикулярна векторам колебаний [3, 6]. Совместное действие первичной и вторичной акустических сил обуславливает аккумуляцию и ускоренную коагуляцию диспергированных капель, что находит применение при разделении эмульсий [7, 8].

Существуют также эффекты, препятствующие разделению эмульсий. Кавитация приводит к дроблению и захвату капель, что может обеспечивать повышение устойчивости эмульсий [1]. Акустические течения, формирующиеся в объёме жидкости под действием колебаний, вызывают перемешивание [9–12]. Акустическая кавитация преимущественно наблюдается при сравнительно низких частотах (~20 кГц) и уже при частотах ~100 кГц уступает место акустическим течениям [13]. Наибольшие трудности при деэмульгации представляют течения Экарта («кварцевый ветер»), один из способов подавления которых был предложен в экспериментах [14].

Эффективность УЗ разделения водно-нефтяных эмульсий была продемонстрирована в ряде лабораторных [8, 13, 15] и пилотных экспериментов [16, 17].

Конфигурация УЗ резонатора оказывает существенное влияние на протекание процессов, что затрудняет сравнение результатов исследований различных авторов. Изучение динамики разделения – это попытка найти способ обобщения разрозненных исследований.

Цель данных экспериментов – проследить изменение в динамике эмульсии в зависимости от интенсивности УЗ излучения. Работа развивает эксперименты авторов [18], посвящённые акустическим течениям. Рассматриваются эмульсии на основе маловязкого и вязкого масел. Внимание уделяется поиску оптимального соотношения акустических сил и акустических течений/кавитации.

2. Экспериментальная установка и методика измерений

Для обработки эмульсий был изготовлен УЗ резонатор с возможностью изменения расстояния между излучающей и отражающей поверхностями. Резонатор (1) был изготовлен в виде прозрачного контейнера из оргстекла, который устанавливался на столик (2), оборудованный окном с рассеивающим матовым стеклом (рис. 1, а). Под резонатором на лабораторном столе помещался диодный осветитель (3). Свет, рассеянный на матовом стекле, равномерно освещал рабочий слой. Картина яркости, формировавшаяся при прохождении света через слой, захватывалась камерой Basler acA2000-165uc (4) (или IDS UI-3260CP-C-HQ), установленной над резонатором, на штативе (5). Теневые фотографии, полученные посредством видеосъёмки, были использованы для количественного описания процессов массопереноса, протекавших в исследуемых эмульсиях. Частота и амплитуда УЗ воздействия задавались посредством генератора сигналов Rigol DG1022Z (6), сигнал с которого проходил через высокочастотный усилитель Falco Systems WMA-300 (7) и подавался на электрический вход резонатора. Работа электрического контура резонатора контролировалась при помощи осциллографа АКПП-4115/3А (8). Для нахождения интенсивности УЗ воздействия I рассчитывалось отношение электрической мощности $P = U_0^2/R_{УЗИ}$, рассеиваемой УЗИ, к площади его волновода $\pi D_{УЗИ}^2/4$:

$$I = \frac{4U_0^2}{\pi R_{УЗИ} D_{УЗИ}^2},$$

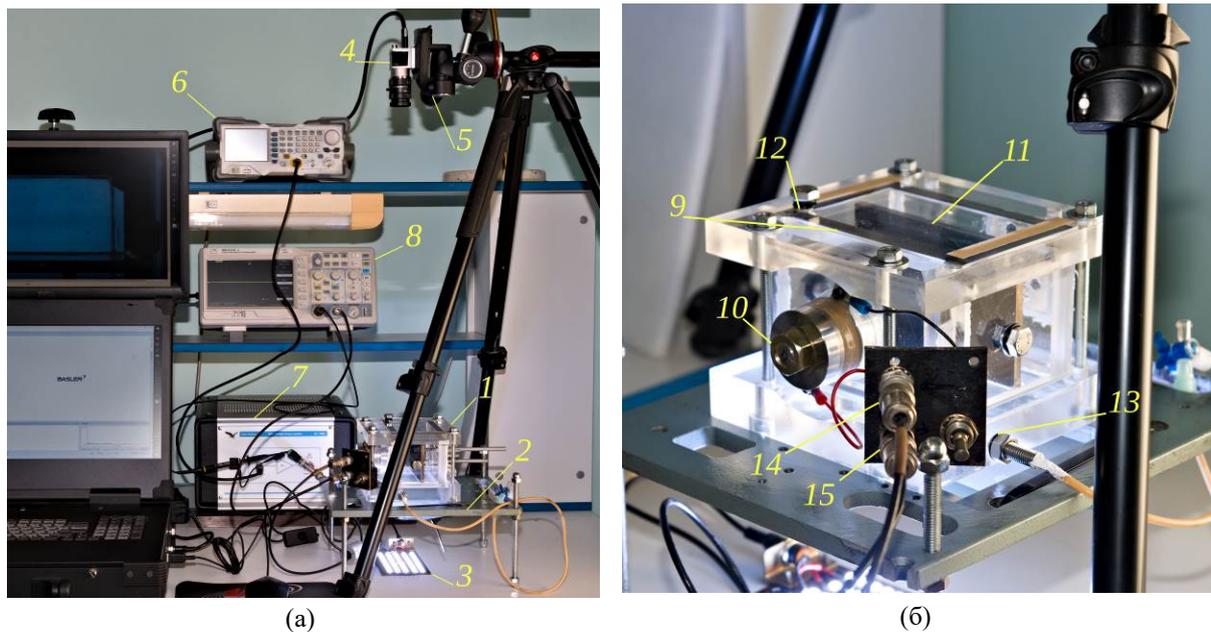


Рис. 1. Фотографии экспериментальной установки: а – общий вид, б – ячейка крупным планом; расшифровка обозначений дана в тексте

где U_0 – амплитуда напряжения на клеммах УЗИ, $R_{\text{УЗИ}}$ – его сопротивление в резонансе, $D_{\text{УЗИ}}$ – диаметр волновода УЗИ в месте его соединения со стенкой ячейки.

Внутренние размеры ячейки резонатора следующие: длина $L = 100.0$ мм, высота $H = 60.0$ мм, толщина $d' = 60.0$ мм. Колебания передавались в жидкость с поверхности стенки (9), в которой был закреплён на резьбовом соединении ультразвуковой излучатель (УЗИ) CN8038-40НВ (10) (рис. 1, б). УЗ воздействие осуществлялось вдоль горизонтальной оси. Отражающей поверхностью служила подвижная алюминиевая пластина (11), положение которой выбиралось в соответствии со свойствами жидкости и частотой УЗ излучения. Толщина рабочего слоя d определялась положением отражателя и изменялась в диапазоне $d = (0-55)$ мм. Для удобства настройки последнего на верхней стенке ячейки была наклеена миллиметровая шкала. Для заполнения и опорожнения рабочего объёма ячейка была оснащена отверстиями (12) и (13). Резонатор оборудован входом для управляющего электрического сигнала (14) и электрическим выходом для измерения рассеиваемой мощности (15). Измерительный блок задействуется в режиме настройки резонанса и отключается в рабочем режиме.

Температура в лаборатории составляла (25 ± 1) °С. Для предотвращения нагрева рабочего слоя расположенным внизу осветителем был установлен вентилятор, обеспечивавший отвод тепла от осветителя.

В ходе эксперимента на камеру записывались серии изображений, полученных при просвечивании рабочего слоя рассеянным светом. Серии

изображений обрабатывались на компьютере при помощи программы ImageJ.

2.1. Приготовление эмульсий

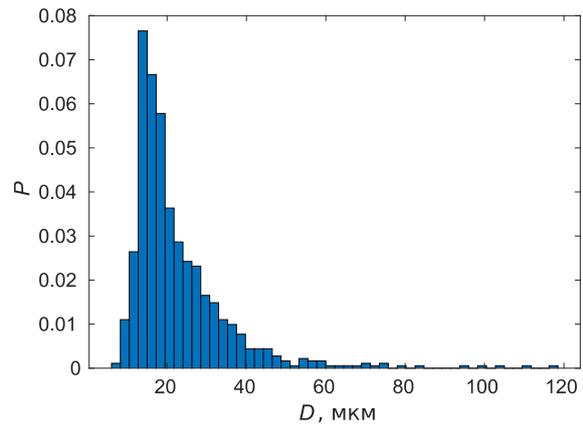
Для создания дисперсной системы использованы дистиллированная вода в качестве дисперсной фазы и силиконовые масла ПМС-5, ПМС-100 в качестве дисперсионной среды. В процессе приготовления эмульсий в смесь добавлялось поверхностноактивное вещество (ПАВ) Triton X-100. Жидкости в требуемой пропорции помещались в герметично закрытый контейнер и перемешивались путём интенсивного встряхивания в течение десяти минут. Приготовленные таким образом эмульсии имели следующие характеристики: ПМС-100: средний диаметр – 23 мкм, медианный – 19 мкм (выборка из 807 капель); ПМС-5: средний диаметр – 26 мкм, медианный – 19 мкм (выборка из 110 капель).

Для исследования эмульсий применялся микроскоп Zeiss SteREO Discovery.V12 с объективом Zeiss PlanApo S 1.5x FWD 30mm. На дно чашки Петри помещалась приготовленная эмульсия объёмом 1 мл. Она растекалась свободным образом, не задевая при этом вертикальных стенок чашки и образуя тонкий слой.

Пример микрофотографии ПМС-100, использованной для измерения размера капель, приведён на рис. 2, а. Видно, что капли распределены в объёме на разной высоте. Большинство из них находится во взвешенном состоянии, и лишь порядка полусотни капель уже осели на момент фотографии. Распределение капель по размерам, соответствующее данной фотографии, показано на рис. 2, б. Для капель, осевших на дно чашки, было приня-

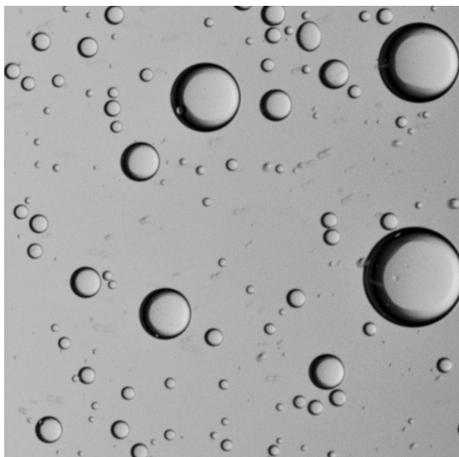


(a)

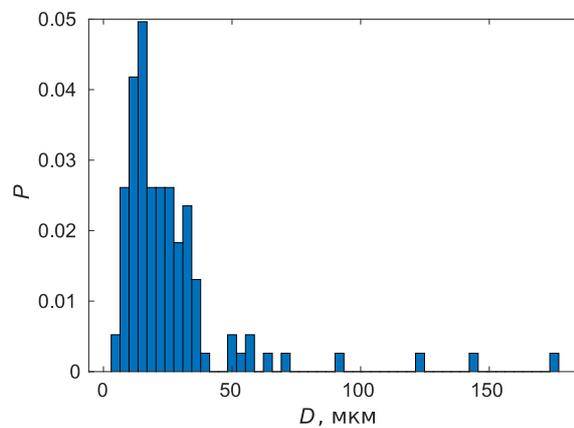


(б)

Рис. 2. 5%-ная эмульсия воды в ПМС-100: а – фотография, сделанная под микроскопом с 130-кратным увеличением; изображение охватывает поле 1 мм x 1 мм; б – распределение капель по диаметру, соответствующее фотографии а



(a)



(б)

Рис. 3. 5%-ная эмульсия воды в ПМС-5: а – фотография, сделанная под микроскопом с 130-кратным увеличением; изображение охватывает поле 1 мм x 1 мм; б – распределение капель по диаметру, соответствующее фотографии а

то считать, что они имеют полусферическую форму. В соответствии с этим при анализе распределения для них был рассчитан эквивалентный диаметр $D = 2^{-1/3} D_{\text{изображения}}$.

Микрофотография и распределение капель по размерам для ПМС-5 приведены на рис. 3, где видно, что подавляющее большинство капель распределены в один слой и находятся в сидячем состоянии.

Наблюдение эмульсий под микроскопом показывает, что распределения по диаметрам в двух случаях сравнительно близки. В силу различия в вязкости масла в случае ПМС-5 осаждение и коагуляция капель происходят быстрее.

Характерные значения плотности и скорости звука составили, соответственно, $\rho_c = 10^3 \text{ кг/м}^3$ и $c_c = 1.5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ – для воды, $\rho_0 = 0.9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и $c_0 = 1.35 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ – для силиконовых масел.

Акустофоретический коэффициент определяется выражением [5]

$$K_s = \frac{1}{3} \left(\frac{5\rho - 2}{2\rho + 1} - \frac{1}{\rho\sigma^2} \right),$$

где $\rho = \rho_c/\rho_0$ – отношение плотности частицы к плотности среды, $\sigma = c_c/c_0$ – отношение скоростей звука. Для рассмотренных пар жидкостей $\rho = 1.11$, $\sigma = 1.11$, следовательно, коэффициент K_s составляет приблизительно 0.125. Это означает, что капли воды, диспергированной в силиконовом масле, под действием акустофоретической силы будут двигаться к узлам стоячей УЗ волны. По своим свойствам выбранная модельная дисперсная система близка к некоторым видам промышленной обводнённой нефти. В настоящей работе использовались 5%-ные эмульсии.

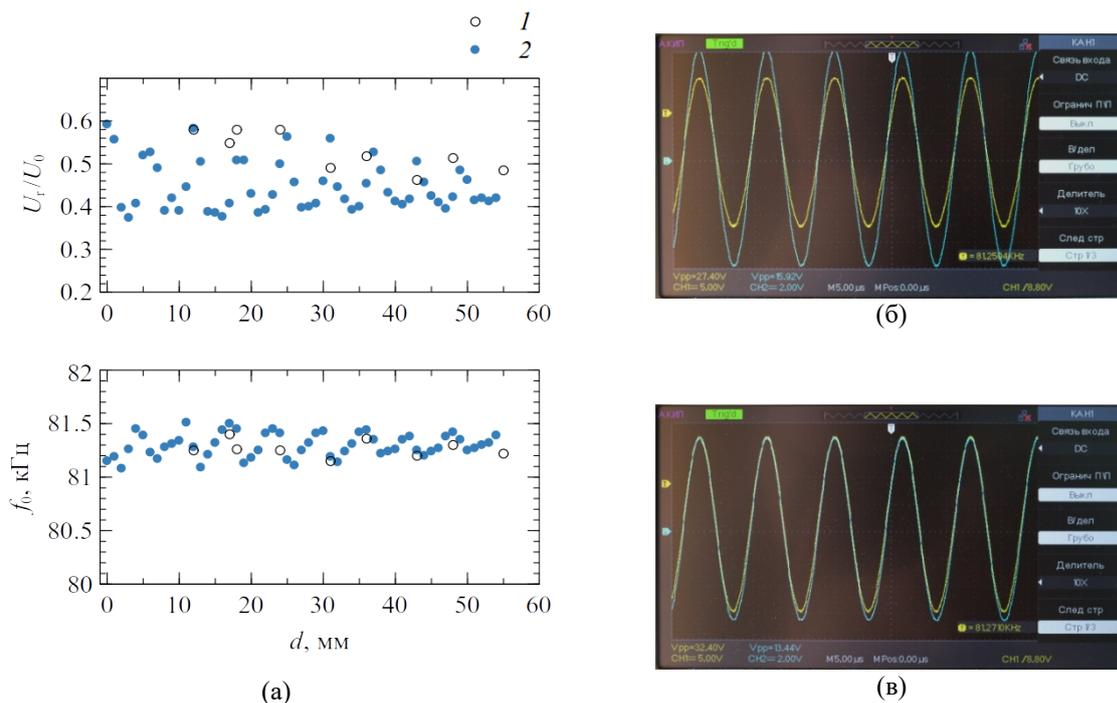


Рис. 4. Зависимость характеристики акустического импеданса U_T/U_0 и резонансной частоты f_0 от расстояния между излучающей и отражающей поверхностями d (а); примеры осциллограмм в случаях резонанса с высоким (б) и низким адмиттансом (в)

2.2. Предварительная настройка резонатора

УЗ резонатор имеет два параметра подстройки: расстояние между излучающей и отражающей поверхностями и частота УЗ излучения. Подстройка частоты осуществляется в окрестности собственной частоты излучателя. В свою очередь, перемещение отражателя позволяет привести толщину рабочего слоя резонатора в соответствие с частотой таким образом, чтобы обеспечить пространственный резонанс и существование стоячей УЗ волны.

В работе использован УЗИ CN8038-40НВ с пьезокерамическим элементом типа PZT-8. Его характеристики: диаметр волновода $D_{узи} = 40$ мм, собственная частота без нагрузки 80.8 кГц, резонансное сопротивление $R_{узи} < 25$ Ом.

Резонатор представляет собой сложную, многослойную систему, для которой, как известно из существующей научной литературы [5], характерен весьма плотный резонансный спектр. Для нахождения резонанса измеряется сила тока через цепь излучателя, которая определяется по величине напряжения на активном сопротивлении, включённом последовательно с УЗИ в режиме настройки.

Выполнено сканирование по толщине слоя d с шагом 1 мм, при котором на каждом шаге выполнялась настройка на резонансную частоту. В качестве характеристики адмиттанса используется отношение напряжения на сопротивлении U_T к пол-

ному напряжению в цепи излучателя U_0 . Результаты измерений показывают, что в зависимости от толщины слоя возбуждаются резонансы с высоким и низким адмиттансом (рис. 4, а). При этом максимальное значение U_T/U_0 достигает 150 % от минимального, что указывает на значимость настройки пространственного резонанса с точки зрения эффективности УЗ воздействия. Одновременно с этим резонансные частоты укладываются в достаточно узкий диапазон, порядка 0.5 кГц, что меньше допуска собственной частоты, заявленного производителями УЗИ. Точки 1 и 2, полученные при прямом и обратном ходе по d , соответственно, удовлетворительно согласуются между собой (рис. 4, а).

3. Результаты экспериментов

В начальный момент времени, сразу после заполнения ячейки эмульсией, изображение, получаемое при просвечивании рабочего слоя рассеянным светом, представляет собой однородное серое поле (рис. 5, а). В отсутствие УЗ воздействия с течением времени в слое развивается конвекция, о наличии которой можно судить по пространственной неоднородности уровня серого (рис. 5, б). Наблюдаемая структура позволяет предположить существование ячеек, периодических относительно длины слоя (рис. 5, в).

В УЗ поле структуры имеют качественной иной вид: они приобретают участки, вытянутые вдоль слоя, т.е. поперёк оси излучения OO' (рис. 5, г, д).

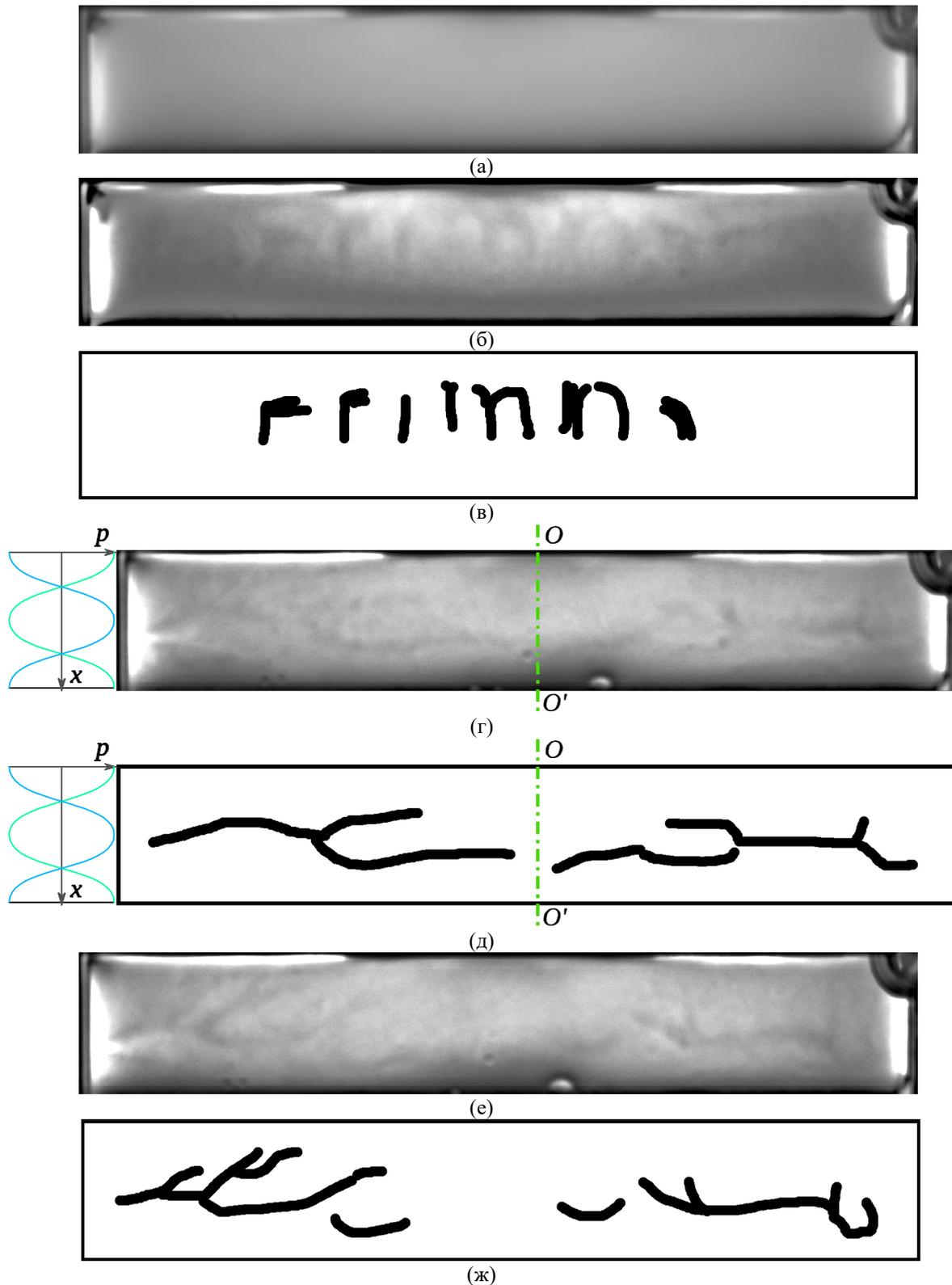
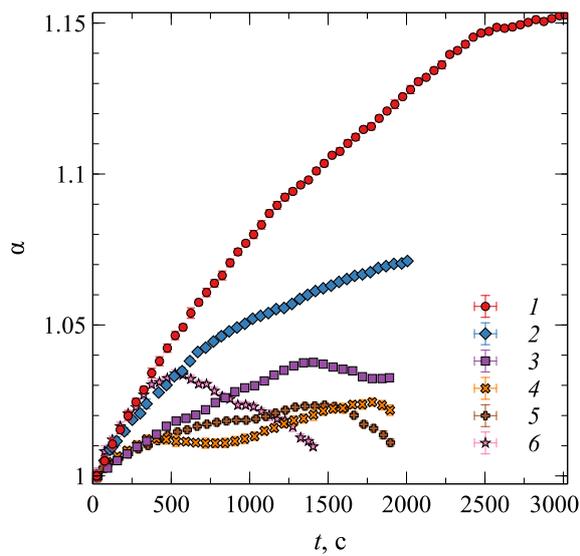


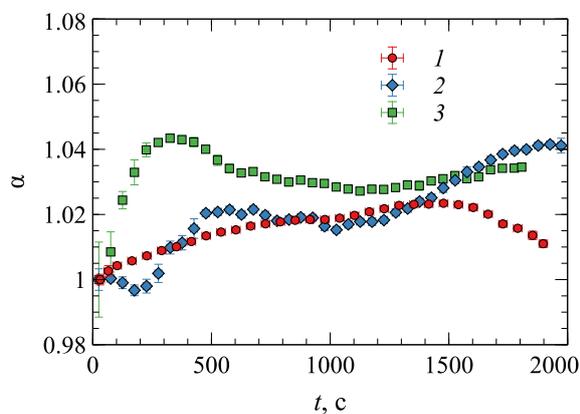
Рис. 5. Фотографии рабочего объёма (вид сверху, в проходящем свете): а – в начальный момент времени; б, в – в отсутствие УЗ воздействия в момент времени $t = 225$ с; г, д – при УЗ воздействии с интенсивностью $I = 0.68$ Вт/см² в момент $t = 401$ с; е, ж – то же, в момент 545 с. На изображениях б, г, е усилен контраст для читаемости структур; на изображениях в, д, ж воспроизведены наиболее выраженные фрагменты структур. Дисперсионная среда – ПМС-5

Здесь и далее в статье рассматриваются результаты, полученные при зазоре слоя $d = 18$ мм, что соответствует локальному максимуму U_T/U_0 (рис. 4, а). Как можно видеть из графика, резона-

тор при этом работает на частоте $f_0 = 81.5$ кГц. Учитывая, что характерная скорость звука в силиконовом масле $c_0 = 1.35 \cdot 10^3$ м/с, получим оценку длины звуковой волны: $\lambda = c_0 f_0^{-1} \approx 17$ мм. Таким образом, пренебрегая тонкой стенкой между излучателем и жидкостью, можно считать, что эксперименты выполняются при $d \approx \lambda$. На излучателе, отражателе и в середине слоя при этом располагаются пучности стоячей волны, а между ними – два узла (рис. 5, з, д). Структуры трансформируются с течением времени (рис. 5, е, ж).



(а)



(б)

Рис. 6. Временная зависимость средней яркости изображения α для дисперсионной среды ПМС-5: а) – $I = (0, 0.36, 0.68, 1.03, 1.38, 1.93)$ Вт/см² (точки 1–6, соответственно); б) – сравнение при близких значениях интенсивности $I = (1.38, 1.47, 1.55)$ Вт/см² (точки 1–3, соответственно)

Проследим за эволюцией эмульсии. Для этого воспользуемся такой характеристикой, как средний по полю уровень серого. Обозначим его значение, нормированное на уровень серого в нулевой

момент времени, как α . Для каждой реализации эксперимента используется постоянное значение интенсивности УЗ воздействия, производится новая заливка жидкости и осуществляется видеорегистрация. Результаты различных экспериментов сгруппированы на графиках (рис. 6, 7).

В отсутствие ультразвукового воздействия α постепенно возрастает (рис. 6, точки 1; рис. 7, 1). Как можно видеть из сравнения графиков, в маловязкой среде (ПМС-5) изменение цвета эмульсии происходит быстрее, чем в вязкой (ПМС-100). Этот факт легко объяснить тем, что скорость движения капель воды – основной источник изменения цвета – понижается с вязкостью. Одновременно, в ПМС-100 не удаётся наблюдать настолько отчётливых конвективных структур.

Как конвективные структуры, так и уровень серого не воспроизводятся в точности в различных реализациях экспериментов. На графике на рис. 6, б проведено сравнение трёх экспериментов с ПМС-5 при близких значениях I . Как можно видеть, серии точек имеют похожий характер, но различаются количественно.

При УЗ воздействии яркость изображений изменяется. В маловязкой среде ПМС-5 наблюдается понижение α , которое изменяется немонотонно с интенсивностью УЗ излучения (рис. 6, точки 2–6). Минимальное в среднем значение α наблюдается при $I = 1.03$ Вт/см² (точки 4). Кроме того, наблюдается немонотонный характер самих кривых $\alpha(t)$. Это свойство становится более выраженным с повышением I и согласуется с усложнением динамики конвективных структур.

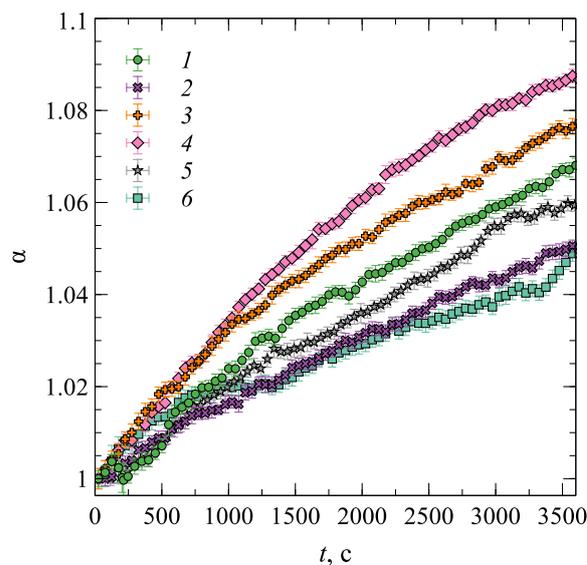
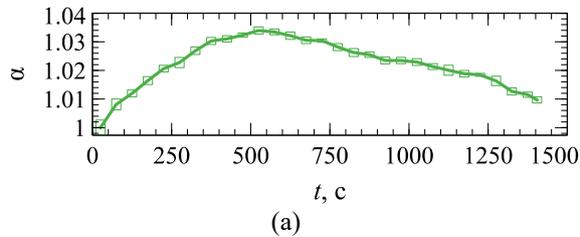


Рис. 7. Временная зависимость средней яркости изображения α для ПМС-100; $I = (0, 0.12, 0.48, 1.25, 1.53, 2.39)$ Вт/см² (точки 1–6, соответственно)

В вязкой среде ПМС-100 характер зависимости $\alpha(t)$ качественно не изменяется. Изменение среднего значения α происходит также немонотонно. При этом в зависимости от интенсивности УЗ воздействия наблюдается как повышение, так и понижение параметра α (рис. 7).

3.1. Высокая интенсивность УЗИ: акустические течения и кавитация



(б)



(в)



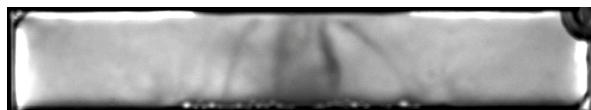
(г)



(д)



(е)



(ж)



(з)

Рис. 8. Эволюция эмульсии на основе ПМС-5 при $I = 1.93 \text{ Вт/см}^2$: а – временная зависимость средней яркости; фотографии в моменты: б – $t = 0 \text{ с}$; в, г – 300 с ; д, е – 525 с ; ж, з – 1348 с ; контраст изображений (в, д, ж) усилен для удобства восприятия; на изображениях (г, е, з) воспроизведены наиболее выраженные черты структур

Остановимся отдельно на случае сравнительно высокой интенсивности I , под которым будем понимать ситуацию, когда акустические течения и кавитация ощутимо влияют на динамику эмульсии. В настоящих экспериментах это $I > 1 \text{ Вт/см}^2$. Проследим, как акустические течения влияют на эволюцию конвективных структур.

Рассмотрим для начала динамику маловязкой жидкости. Средняя яркость изображения изменяется с течением времени немонотонно (рис. 8, а). На первом этапе на поверхности слоя появляются пузырьки, свидетельствующие о кавитации в объеме жидкости, и вырисовываются структуры, указывающие на перераспределение жидкостей внутри эмульсии (рис. 8, в, г). Вблизи излучателя (верхняя граница фотографии) можно различить небольшое темное пятно. В окрестности максимума α структуры на фотографии немного теряют отчётливость, а темный участок вблизи излучателя становится более выраженным (рис. 8, д, е). С течением времени конвективная структура полностью перестраивается: на оси излучения формируется выраженная струя, расходящаяся конически, а крайние участки слоя размываются и теряют отпечатки структур (рис. 8, ж, з).

В случае вязкой жидкости фотографии слоя представляют собой в целом достаточно однородные серые картины. Средняя яркость возрастает монотонно (рис. 9, а). На ранних этапах на поверхности появляются пузырьки, всплывающие из объема слоя (рис. 9, в). Трековая визуализации, полученная путём наложения последовательных фотографий, демонстрирует, что на ранних этапах эволюции эмульсии пузырьки всплывают вертикально: на рис. 9, г треки расходятся в различных направлениях в соответствии с перспективой изображения. С течением времени на оси излучения также формируется конвективная струя (рис. 9, д, е). В случае вязкой жидкости она более локализована: извивается, но остаётся тонкой. Формирование осевого акустического течения приводит к изменению траекторий пузырьков: они расходятся от излучателя (рис. 9, ж).

3.2. Обсуждение результатов

Вязкость жидкости, образующей дисперсионную среду, существенно влияет на информативность картин яркости, полученных при просвечивании слоя. В экспериментах на ПМС-5 можно наблюдать появление темных полос в окрестности узлов стоячей волны при УЗ воздействии (рис. 5, г, д). Данное перестроение конвективной структуры свидетельствует о разделении фаз под действием стоячей УЗ волны.

Помимо акустофоретической силы [4] УЗ колебания вызывают два других существенных эффекта: кавитацию и акустические течения [3, 10]. Последние являются нежелательными при деэмульсации, так как оказывают противоположное дей-

ствие, приводя к перемешиванию фаз. В настоящем исследовании акустические течения проявляются в среднем при $I > 1$ Вт/см². Кавитация также усиливается с интенсивностью УЗ воздействия. Структуры, наблюдаемые на рис. 8, ж, з и рис. 9, д, е, относятся к течениям Экарта («кварцевый ветер»). Аналогичные конвективные структуры наблюдались в работе [18].

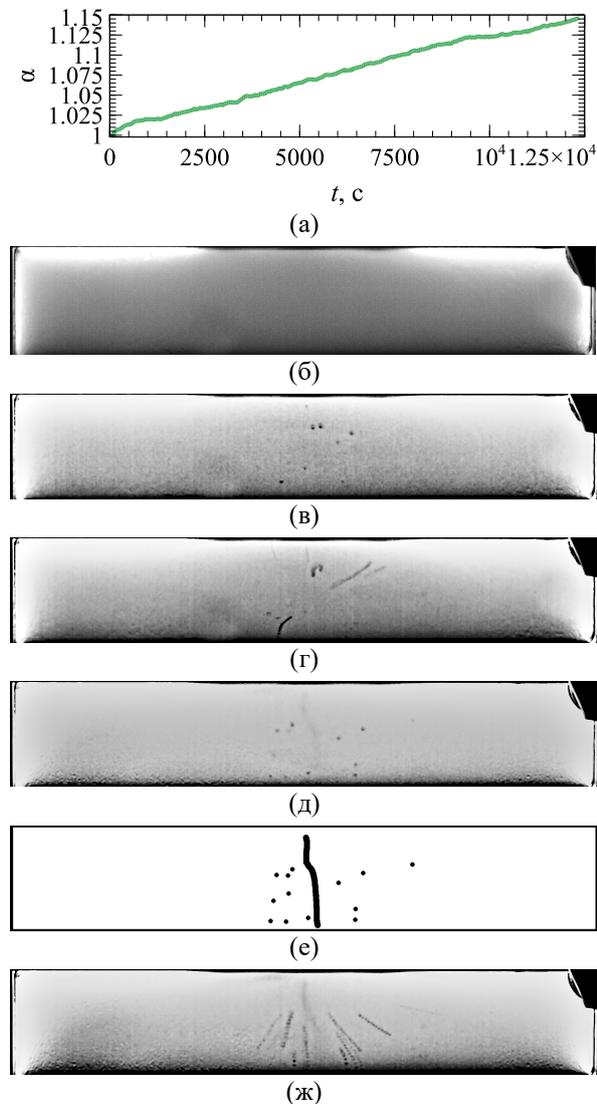


Рис. 9. Эволюция эмульсии на основе ПМС-100 при $I = 2.39$ Вт/см²: а – временная зависимость яркости; фотографии в моменты: б) – $t = 0$ с; в) – 80 с; г) – интервал 70–90 с, трековая картина д), е) – 9280 с; ж) – интервал 9270–9290 с, трековая картина; контраст изображений (в, г, д, ж) усилен для удобства восприятия; на изображении (е) воспроизведены основные черты фотографии (д)

Наблюдение динамики формирования течений Экарта (рис. 8, ж, з) указывает на то, что оно происходит медленнее, чем формирование структур, ассоциируемых с акустофорезом (рис. 5, з, д;

рис. 8, в, з). Продолжительность УЗ обработки является важным параметром для оптимизации технологического процесса. Помимо поиска оптимального времени УЗ разделения, как это было сделано, например, в работах [13, 16, 17], имеет смысл рассмотреть возможность прерывистого УЗ воздействия и проводить поиск оптимальных интервалов. Потенциально, это могло бы снизить эффект перемешивания акустическими течениями и одновременно накапливать эффект разделения, суммируя последовательные интервалы.

В научной литературе существует представление об оптимальной интенсивности воздействия, при которой достигается наиболее выгодный для целей деэмульгации баланс между различными акустическими эффектами [3, 19]. При этом достигается максимальная эффективность деэмульгации [13]. Для сравнения различных экспериментов в нашем случае воспользуемся следующей интегральной характеристикой:

$$\beta = \int_0^{t_1} \alpha dt,$$

где для ПМС-5 в качестве конца интервала интегрирования выбрано время $t_1 = 1200$ с.

Зависимость интеграла яркости, нормированного на значение в отсутствие УЗ β_0 , в случае маловязкой жидкости изменяется немонотонно с интенсивностью акустического воздействия I . Характеристика β/β_0 имеет выраженный минимум в окрестности $I = 1$ Вт/см² (рис. 10, а). Однако картины яркости, полученные в экспериментах с вязкой жидкостью, не позволяют получить отчетливую зависимость $\beta/\beta_0(I)$ (рис. 10, б).

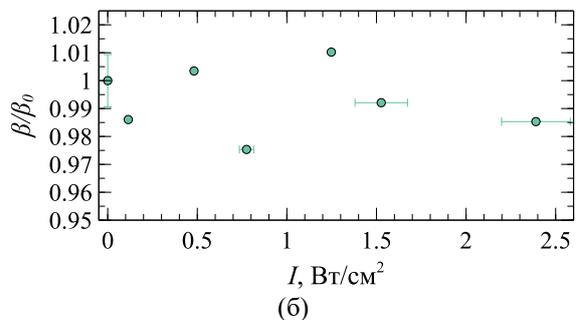
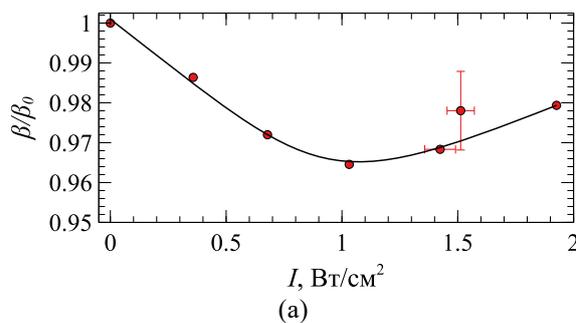


Рис. 10. Зависимость нормированного интеграла яркости от интенсивности УЗ воздействия для сред: а) – ПМС-5; б) – ПМС-100

Немонотонный характер зависимости $\beta/\beta_0(I)$ в случае ПМС-5 коррелирует с генерацией акустических течений. В экспериментах [13, 19] была показана немонотонная зависимость эффективности разделения водно-масляной эмульсии от интенсивности УЗ воздействия: при значениях I , выше оптимального, эффективность постепенно снижалась из-за влияния кавитации и акустических течений. Между двумя случаями прослеживается аналогия и качественное согласие.

4. Заключение

Экспериментально изучена динамика модельных водно-масляных эмульсий на основе силиконовых масел ПМС-5 и ПМС-100 при частоте УЗ воздействия ~ 80 кГц и концентрации дисперсной фазы 5%. Измерены уровни яркости картин слоя рабочей жидкости в проходящем рассеянном свете.

Наблюдение динамики эмульсии в проходящем свете позволило обнаружить формирование конвективных структур, указывающих на перераспределение жидкостей. Структуры, формирующиеся под действием акустофоретической силы, принципиально отличаются от тех, которые наблюдаются при свободном гравитационном осаждении. Наиболее информативными оказались изображения, полученные в экспериментах с маловязкой жидкостью.

Экспериментально продемонстрированы два основных эффекта, вызываемые УЗ воздействием и препятствующие разделению эмульсий: кавитация и акустические течения. Формирование акустофоретических структур происходит заметно быстрее, чем установление акустических течений. Это свойство даёт пространство для манёвра при поиске оптимальных параметров. В качестве потенциально перспективного подхода можно рассматривать прерывистую УЗ обработку.

Измерение средней яркости изображений показало немонотонный характер зависимости динамики эмульсии от интенсивности ультразвукового воздействия. Зависимость интегральной яркости изображений ПМС-5 от интенсивности УЗ воздействия имеет экстремум, положение которого согласуется с проявлением акустических течений. Формирование струи «кварцевого ветра» на оси излучения приводит к изменению динамики эмульсии при достаточно высокой интенсивности воздействия.

В работе показано, что для оптимизации процесса разделения можно поставить задачу о согласованном регулировании интенсивности УЗ воздействия и времени обработки. Потенциал такого подхода ещё не раскрыт до конца в существующих исследованиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования и науки Пермского края (грант № 20-41-596009).

Список литературы

1. *Leong T. S. H., Martin G. J. O., Ashokkumar M.* Ultrasonic encapsulation – A review // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017. Vol. 35. P. 605–614. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.03.017
2. *Trujillo F. J., Juliano P., Barbosa-Cánovas G., Knoerzer K.* Separation of suspensions and emulsions via ultrasonic standing waves – A review // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014. Vol. 21. N. 6. P. 2151–2164. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2014.02.016
3. *Luo X., Cao J., Gong H., Yan H., He L.* Phase separation technology based on ultrasonic standing waves: A review // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. Vol. 48. P. 287–298. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.06.006
4. *Горьков Л. П.* О силах, действующих на малую частицу в акустическом поле в идеальной жидкости // *Доклады АН СССР*. 1961. Т. 140. № 1. С. 88–91.
5. *Gröschl M.* Ultrasonic separation of suspended particles – Part I: Fundamentals // *Acta Acust. united Ac.* 1998. Vol. 84. P. 432–447.
6. *Crum L. A.* Acoustic force on a liquid droplet in an acoustic stationary wave // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1971. Vol. 50. P. 157–163.
7. *Pangu G. D., Feke D. L.* Droplet transport and coalescence kinetics in emulsions subjected to acoustic fields // *Ultrasonics*. 2007. Vol. 46. P. 289–302.
8. *Nii S., Kikumoto S., Tokuyama H.* Quantitative approach to ultrasonic emulsion separation // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2009. Vol. 16. N. 1. P. 145–149. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2008.07.005
9. *Красильников В. А., Крылов В. В.* Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 403 с.
10. *Eckart C.* Vortices and streams caused by sound waves // *Physical Review*. 1948. Vol. 73. P. 68–76. DOI: 10.1103/PhysRev.73.68
11. *Рэлей (Стретт Дж.В.).* Теория звука. Том 2 (2-е изд.) М.: ГИТТЛ, 1955. 476 с.
12. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 711 с.
13. *Luo X., Gong H., Cao J., Yin H., Yan Y., He L.* Enhanced separation of water-in-oil emulsions using ultrasonic standing waves // *Chemical Engineering Science*. 2019. Vol. 203. P. 285–292. DOI: 10.1016/j.ces.2019.04.002
14. *Spengler J., Jekel M.* Ultrasound conditioning of suspensions – studies of streaming influence on

- particle aggregation on a lab- and pilot-plant scale // *Ultrasonics*. 2000. Vol. 38. P. 624–628. DOI: 10.1016/s0041-624x(99)00145-6
15. Dionne J., McCarthy B., Ross-Johnsrud B., Masi L., Lipkens B. Large volume flow rate acoustophoretic phase separator for oil water emulsion splitting // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2013. Vol. 133. N. 5, 3237. DOI: 10.1121/1.4799373
 16. Сахабутдинов Р. З., Судыкин А. Н., Губайдулин Ф. Р. Исследование процесса обезвоживания сверхвязкой нефти при ультразвуковом воздействии // *Нефтяное хозяйство*. 2013. № 10. С. 116–119.
 17. Судыкин А. Н., Губайдулин Ф. Р., Шагеев Р. Х., Рафиков С. Б., Гиззатуллин Ф. С. Результаты пилотных испытаний технологии подготовки сверхвязкой нефти с применением ультразвукового коалесцентора // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2014. №. 6. С. 56–60.
 18. Козлов Н. В. Экспериментальное изучение акустических течений, генерируемых ультразвуковым излучением // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2022. № 1. С. 28–37. DOI: 10.17072/1994-3598-2022-1-28-37
 19. Johansson L., Singh T., Leong T., Mawson R., McArthur S., Manasseh R., Juliano P. Cavitation and non-cavitation regime for large-scale ultrasonic standing wave particle separation systems – In situ gentle cavitation threshold determination and free radical related oxidation // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016. Vol. 28. P. 346–356. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.08.003
- ### References
1. Leong T. S. H., Martin G. J. O., Ashokkumar M. Ultrasonic encapsulation – A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 35, pp. 605–614. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.03.017
 2. Trujillo F. J., Juliano P., Barbosa-Cánovas G., Knoerzer K. Separation of suspensions and emulsions via ultrasonic standing waves – A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, vol. 21, no. 6, pp. 2151–2164. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2014.02.016
 3. Luo X., Cao J., Gong H., Yan H., He L. Phase separation technology based on ultrasonic standing waves: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, vol. 48, pp. 287–298. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.06.006
 4. Gor'kov L. P. On the forces acting on a small particle placed in an acoustic field in an ideal liquid. *Sov. Phys. Dokl.*, 1962, vol. 6, no. 9, pp. 773–775.
 5. Gröschl M. Ultrasonic separation of suspended particles – Part I: Fundamentals. *Acta Acust. united Ac.*, 1998, vol. 84, pp. 432–447.
 6. Crum L. A. Acoustic force on a liquid droplet in an acoustic stationary wave. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1971, vol. 50, pp. 157–163.
 7. Pangu G. D., Feke D. L. Droplet transport and coalescence kinetics in emulsions subjected to acoustic fields. *Ultrasonics*, 2007, vol. 46, pp. 289–302.
 8. Nii S., Kikumoto S., Tokuyama H. Quantitative approach to ultrasonic emulsion separation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2009, vol. 16, no. 1, pp. 145–149. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2008.07.005
 9. Krasilnikov V. A., Krylov V. V. *Vvedenie v fizicheskuiu akustiku* [Introduction to Physical Acoustics]. Moscow: Nauka, 1984. 403 p. (In Russian)
 10. Eckart C. Vortices and streams caused by sound waves. *Physical Review*, 1948, vol. 73, pp. 68–76. DOI: 10.1103/PhysRev.73.68
 11. Rayleigh (Strutt J. W.) *The Theory of Sound; Vol. 2*. Creative Media Partners, LLC, 2018. 334 p.
 12. Schlichting H. *Boundary Layer Theory*. New York, USA: McGraw-Hill, 1979. 817 p.
 13. Luo X., Gong H., Cao J., Yin H., Yan Y., He L. Enhanced separation of water-in-oil emulsions using ultrasonic standing waves. *Chemical Engineering Science*, 2019, vol. 203, pp. 285–292. DOI: 10.1016/j.ces.2019.04.002
 14. Spengler J., Jekel M. Ultrasound conditioning of suspensions – studies of streaming influence on particle aggregation on a lab- and pilot-plant scale. *Ultrasonics*, 2000, vol. 38, pp. 624–628. DOI: 10.1016/s0041-624x(99)00145-6
 15. Dionne J., McCarthy B., Ross-Johnsrud B., Masi L., Lipkens B. Large volume flow rate acoustophoretic phase separator for oil water emulsion splitting. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, vol. 133, no. 5, 3237. DOI: 10.1121/1.4805171
 16. Sakhabutdinov R. Z., Sudykin A. N., Gubaidulin F. R. Study of ultrasonic dehydration process for heavy oil. *Oil Industry*, 2013, no. 10, pp. 116–119. (In Russian)
 17. Sudykin A. N., Gubaidulin F. R., Shageev R. K., Rafikov S. B., Gizzatullin F. S. Results of pilot tests of extra-viscous oil treatment technology by applying an ultrasonic coalescer. *Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*, 2014, no. 6, pp. 56–60. (In Russian)
 18. Kozlov N. V. Experimental study of acoustic streaming generated by ultrasonic excitation. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2022, no. 1 pp. 28–37. DOI: 10.17072/1994-3598-2022-1-28-37

19. Johansson L., Singh T., Leong T., Mawson R., McArthur S., Manasseh R., Juliano P. Cavitation and non-cavitation regime for large-scale ultrasonic standing wave particle separation systems – In situ gentle cavitation threshold determination and free radical related oxidation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, vol. 28, pp. 346–356. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.08.003

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Козлов Н. В., Денисова М. О., Мизёв А. И. Эксперименты по ультразвуковому разделению модельной водно-масляной эмульсии // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 2. С. 69–80. doi: 10.17072/1994-3598-2023-2-69-80

Please cite this article in English as:

Kozlov N. V., Denisova M. O., Mizev A. I. Experiments on ultrasonic separation of a model water-in-oil emulsion. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, no. 2, pp. 69–80. doi: 10.17072/1994-3598-2023-2-69-80

Сведения об авторах

1. *Николай Викторович Козлов*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева 1, 614068, Пермь
2. *Мария Олеговна Денисова*, канд. физ.-мат. наук, н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013.
3. *Алексей Иванович Мизёв*, д-р. физ.-мат. наук, доцент, директор, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013.

Author information

1. *Nikolai V. Kozlov*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia
2. *Maria O. Denisova*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
3. *Alexey I. Mizev*, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.