

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

Экспериментальное изучение акустических течений, генерируемых ультразвуковым излучением

Н. В. Козлов

Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614068, Пермь, ул. Ак. Королева, 1
email: kozlov.n@icmm.ru

Работа посвящена экспериментальному изучению акустических течений, вызванных ультразвуковым (УЗ) излучением, в ограниченном объёме жидкости. Кювета представляет собой параллелепипед, частично заполненный жидкостью (водой), в которую сверху погружается пьезоэлектрический УЗ излучатель. Для передачи колебаний в жидкость используется волновод, толщина которого заметно меньше длины УЗ волны. Изучаются структура и скорость акустических течений, формирующихся в объёме, методами анемометрии по изображениям частиц и фотографии. Наблюдения производятся в вертикальном сечении, содержащем ось излучателя, с применением светового ножа, сформированного при помощи непрерывного зелёного лазера. Освещение вызывает нагрев в плоскости светового ножа и приводит к возникновению свободной конвекции. Последняя изучается: рассматриваются структура, скорость и время её установления при различной мощности освещения. Данные о свойствах тепловой конвекции используются при анализе структуры акустических течений. В целом, в рассматриваемой области интереса тепловая конвекция не оказывает существенного влияния на выводы настоящего исследования, однако определяет минимальную скорость, ограничивающую возможность изучения медленных течений. Наблюдаемые акустические течения можно условно разделить на два типа. Первые локализованы вблизи поверхности волновода и являются установившимися. Они обладают регулярной структурой и невысокой характерной скоростью. Течения второго типа занимают весь объём жидкости и непрерывно трансформируются. По величине скорости они на порядок превосходят течения первого типа. Интересной особенностью нестационарных акустических течений является то, что их источниками могут являться стенки контейнера, а не только поверхность волновода. Это указывает на существенный вклад отражённых УЗ волн в движение жидкости при достаточной интенсивности УЗ излучения. Полученные результаты будут использованы при изучении поведения эмульсий в УЗ поле.

Ключевые слова: ультразвуковые колебания; акустические течения

Поступила в редакцию 24.12.21; после рецензии 20.01.22; принята к опубликованию 20.01.22

Experimental study of acoustic streaming generated by ultrasonic excitation

N. V. Kozlov

Institute of continuous media mechanics UB RAS, Ak. Koroleva St. 1, 614068, Perm
email: kozlov.n@icmm.ru

The paper is devoted to an experimental study of the acoustic streaming generated by an ultrasonic (US) irradiation in a confined fluid volume. The container is a parallelepiped, partially filled with liquid (water), into which a piezoelectric US emitter is submerged from the top. To transmit the

oscillations into the fluid, a waveguide is used whose thickness is considerably smaller than the US wavelength. The structure and velocity of the acoustic streaming, which forms in the bulk, are studied by methods of particle image velocimetry and photography. The observations are carried out in the vertical cross section, which contains the beam axis, with the use of a light sheet created by means of a continuous green laser. The illumination produces the heating in the plane of the light sheet and leads to the onset of free convection. The latter is studied: the flow structure and velocity and the time of their settling are considered at different power of illumination. The information on the natural convection properties is used during the analysis of the structure of acoustic streaming. In general, in the considered region of interest, the thermal convection does not have a substantial influence on the outcomes of the present study, but it determines the minimal velocity, which is limiting the possibility of investigation of slow flows. The observed acoustic streaming may be conventionally divided into two kinds. The first is localized near the waveguide surface and is steady-state. It possesses a regular structure and its characteristic velocity is not high. The streaming of the second kind occupies the entire fluid bulk and transforms continuously. Its velocity magnitude is higher by an order than that of first-kind streaming. An interesting peculiarity of the non-stationary acoustic streaming is that its sources may be located on the container boundaries and not only on the waveguide. This finding points to an important contribution of the reflected US waves in the fluid motion at the sufficient intensity of the US irradiation. The obtained results are going to be used during the investigation of the emulsions behavior in US fields.

Keywords: ultrasonic oscillations; acoustic streaming

Received 24.12.21; revised 20.01.22; accepted 20.01.22

doi: 10.17072/1994-3598-2022-1-28-37

1. Введение

Ультразвуковые (УЗ) колебания широко применяются для разделения или формирования эмульсий во многих отраслях промышленности. Современный обзор литературы по разделению водо-нефтяных эмульсий дан в работе [1]. Эффективным и распространённым способом воздействия являются стоячие УЗ волны, которые вызывают следующие физические эффекты. Первичная акустическая сила приводит к осреднённому движению частиц диспергированной фазы (капель), взвешенных в непрерывной фазе (основной объём жидкости), на фоне колебательного движения. При этом частицы аккумулируются в областях с наименьшей потенциальной энергией [2]. Направление движения частиц и место их аккумуляции определяются акустофоретическим коэффициентом, который, в свою очередь, зависит от отношения плотностей диспергированной и непрерывной фаз и аналогичного отношения скоростей звука [1, 3]. Вторичная акустическая сила проявляется при взаимодействии частиц (капель), колеблющихся в окружающей жидкости. Если частицы колеблются вдоль радиуса, соединяющего их центры, на них действует сила отталкивания, если же направление колебаний перпендикулярно ему – действует сила притяжения [1, 4].

В ряде работ была продемонстрирована эффективность применения УЗ воздействия для разделения водо-нефтяных эмульсий как в модельных экспериментах [5–7], так и в пилотных [8, 9].

Эффективность разделения эмульсий ограни-

чена в связи с такими УЗ эффектами, как кавитация и акустические течения. Акустические течения – это нелинейный осреднённый эффект, связанный с тем, что элементы жидкости, совершая колебания, также испытывают в среднем за период ненулевое перемещение. Такие течения представляют серьёзное препятствие для переноса ультразвуковых технологий на масштабы промышленного производства [10]. Известны три основных типа акустических течений, возникающих в реакторах [11]: течения Экарта («кварцевый ветер») [12], течения Рэлея [13] и течения Шлихтинга [14]. Один из возможных подходов для подавления течений первого типа был предложен в экспериментах [15], где перпендикулярно оси УЗ излучения были установлены акустически прозрачные мембраны.

Настоящая работа посвящена изучению акустических течений, генерируемых в ограниченном объёме жидкости. Внимание также уделяется особенностям постановки эксперимента. Данное исследование предваряет эксперименты по изучению динамики эмульсий в УЗ поле.

2. Экспериментальная установка и методика измерений

Рабочий слой жидкости был образован стенками прямоугольного контейнера, расстояние между которыми составляло $L = 77$ мм, и поверхностью волновода, располагавшегося сверху. Пьезоэлектрический ультразвуковой излучатель (УЗИ) имел форму цилиндра с диаметром 40.3 мм, вдоль оси которого происходило распространение колебаний. В данном исследовании использовалась мо-

дель ClangSonic CN8038-40НВ P8 с номинальной частотой (80 ± 2) кГц и мощностью 60 Вт. К излучателю 1 посредством резьбового соединения прижимался волновод из оргстекла 2 в форме тонкого диска диаметра $D = 52$ мм и толщины $h = 4.7$ мм (рис. 1, а). Толщина волновода устанавливалась существенно меньше длины звуковой волны, характерной для его материала – оргстекла. Положим для оценки скорость звука $c_{oc} \approx 2.6 \cdot 10^3$ м/с и частоту $f \approx 81 \cdot 10^3$ Гц, тогда длина волны $\lambda = c_{oc} / f \approx 32$ мм и, как видно, $\lambda \gg h$.

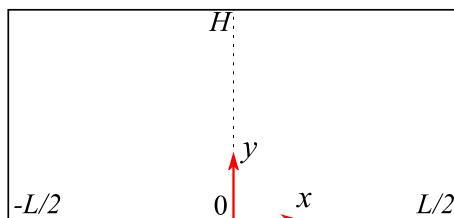
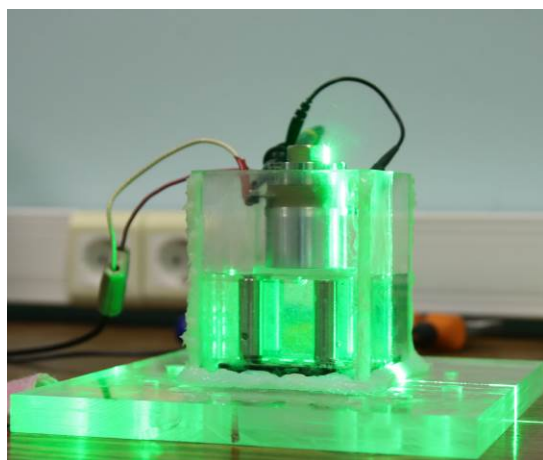
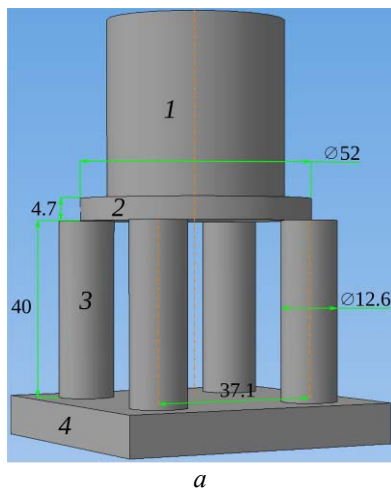


Рис. 1. Схема установки: а – рабочий объём, в котором изучаются акустические течения; б – фотография УЗИ, установленного в кювету, заполненную жидкостью; в – система координат исследуемого слоя

Для крепления излучателя использовался набор высокоточных элементов Thorlabs. Излучатель в сборе с волноводом устанавливался вертикально на четырёх цилиндрических опорах 3, каждая из которых имела диаметр 12.6 мм и высоту $H = 40.0$ мм, таким образом, что излучающая поверхность располагалась над рабочим объёмом жидкости. Опоры были закреплены на плоском отражателе 4 так, что их оси проходили через вершины квадрата со стороной 37.1 мм. При таком расположении опоры находились за пределами цилиндрического объёма непосредственно под излучателем, где реализовались основные режимы акустических течений, и оставляли открытыми области, необходимые для освещения и видеорегистрации. Одновременно такая конструкция позволяет быстро произвести замену волновода или излучателя, не требуя изготовления дополнительных деталей. Опоры в сборе с отражателем были установлены на дне контейнера. Фотография излучателя, установленного в контейнере с жидкостью, приведена на рис. 1, б. Объём между нижней поверхностью волновода и дном контейнера заполнялся рабочей жидкостью (водой), засеянной трассерами.

Производилась подсветка слоя жидкости лазерным ножом в вертикальной плоскости, проходящей через ось излучателя. Для этого применялся твердотельный лазер непрерывного действия KLM-532/h/1000 с длиной волны 532 нм. Лазер имел возможность перестройки мощности в диапазоне от 0 до 1000 мВт. Была произведена фоторегистрация структур течений. Для нахождения скорости течений была применена анемометрия по изображениям частиц (PIV).

Для задания колебаний применялся генератор RIGOL DG1022Z, прямоугольный сигнал с которого преобразовывался высокочастотным усилителем Falco Systems WMA-300 и подавался на УЗИ. Напряжение на излучателе контролировалось при помощи осциллографа АКИП-4115/3А. Рабочий ток усилителя $j = 300$ мА. Мощность, рассеиваемая на УЗИ, рассчитывалась по амплитуде напряжения U_0 , измеренной по осциллограмме как $P = jU_0$. В качестве управляющего параметра использовалась интенсивность ультразвукового воздействия $I = P / (\pi R_0^2)$, где $R_0^2 = 2.6$ см – радиус волновода. Эксперименты были проведены на резонансной частоте УЗИ, $f \approx 81$ кГц в диапазоне интенсивности излучения $I = (0-1)$ Вт/см². Для каждого значения I производилась подстройка f .

В качестве рабочей жидкости была использована дистиллированная вода. Для визуализации течений в жидкость добавлялись частицы-трассеры Dantec – полые стеклянные сферы с серебряным напылением диаметром (2–20) мкм и плотностью приблизительно 1 г/см³ – в количестве 0.0002 от массы жидкости.

2.1. Особенности постановки задачи

Размеры контейнера не согласованы с длиной звуковой волны. Такая ситуация довольно характерна для ряда прикладных исследований, сориентированных на задачи нефтеперерабатывающей промышленности [8, 9]. Проведём оценку. Положим, скорость звука в воде $c_a = 1.5 \cdot 10^3$ м/с. При частоте $f = 81 \cdot 10^3$ кГц длина волны составит $\lambda = c_a / f \approx 1.9$ см. При этом $H / \lambda \approx 2.2$, и видно, что на высоту слоя укладывается немного больше двух длин волн. Это не соответствует условиям формирования стоячей волны, поэтому следует ожидать существования в слое жидкости бегущих УЗ волн как излучённых, так и отражённых.

Известно, что УЗ колебания генерируют осреднённую завихренность в пограничных слоях Стокса, которая вызывает течения, описанные Шлихтингом [14]. При нахождении полей скорости использовался подход последовательного уменьшения окна опроса, размеры которого варьировались в зависимости от скорости течений. Минимальный размер окна составил 24 пикс. В воде, при кинематической вязкости $\nu = 1$ сСт и частоте $f = 81$ кГц, толщина пограничного слоя Стокса $\delta = \sqrt{\nu / \pi f}$ составляет примерно 2 мкм. Высота слоя на изображении составляла порядка 10^3 пикс. Таким образом, на 1 пикс укладывается приблизительно 40 мкм, и выбранный метод исследования не позволяет разрешить структуру течений Шлихтинга. В работе рассматриваются течения более крупного масштаба.

3. Свободная конвекция, вызванная нагревом от лазерного ножа

В отсутствие УЗ колебаний в объёме наблюдается слабая фоновая конвекция, источником которой является нагрев от лазерного излучения. Измерения показали, что в сравнении с интенсивностью течений, генерируемых ультразвуковым воздействием, свободной конвекцией в большинстве случаев можно пренебречь.

При освещении лазерным ножом в слое жидкости формируется конвективное течение. Оно начинается в виде вихря, имеющего восходящий поток вдоль стенки со стороны источника освещения (в данном случае – справа). Постепенно вихрь расширяется в горизонтальном направлении и достигает противоположной стенки контейнера. Затем вблизи дальней стенки формируется второй вихрь, имеющий противоположную закрутку, и оттесняет первый (рис. 2, а). С течением времени размеры вихрей выравниваются, и в слое формируется симметричная картина из двух ячеек с восходящими потоками вблизи стенок и нисходящим потоком в средней части слоя (рис. 3).

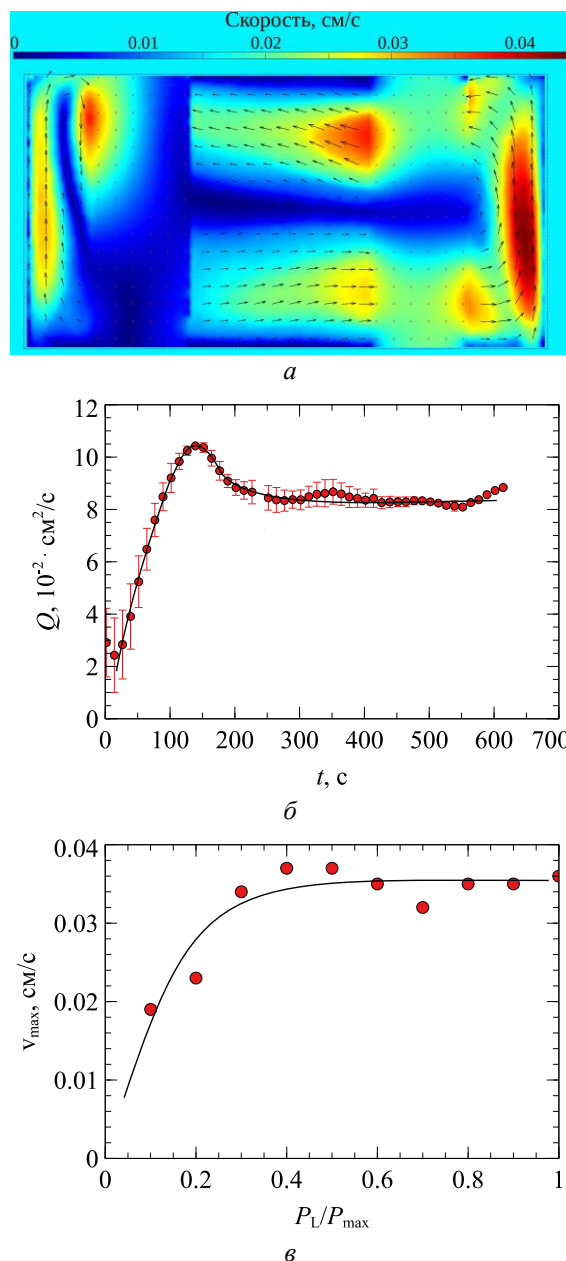


Рис. 2. Свободная конвекция: а – поле скорости тепловой конвекции в момент времени приблизительно 300 с после включения лазера; участки, отмеченные крестиками, перекрыты опорами; б – временная зависимость горизонтального расхода через вертикальное (осевое) сечение, $x = 0$; в – максимальная скорость конвективных течений в средней части слоя (между опорами) в зависимости от мощности излучения, $t \approx 300$ с; $P_{\text{max}} = 1000$ мВт

При освещении непрерывным лазерным ножом с мощностью излучения в диапазоне (0.1–1) Вт формирование конвективных структур происходит достаточно медленно. В интервале порядка 10^3 с наблюдается структура с одной преобладающей ячейкой, примером которой может служить поле скорости на рис. 2, а. В этом случае характерно

наличие противоположных по направлению, практически горизонтальных течений вблизи верхней и нижней границ слоя, и в его средней части. Эта часть конвективной структуры устанавливается за время приблизительно 200 с, как можно видеть на графике временной зависимости горизонтального эффективного расхода через вертикальное среднее сечение (рис. 2, б):

$$Q = \int_0^H |u|_{x=0} \partial y, \quad (3.1)$$

где u – горизонтальная проекция скорости. Как можно видеть из выражения (3.1), скорость под интегралом берётся по модулю; таким образом, Q равно сумме расходов в противоположных направлениях в верхней и нижней частях слоя.

Стоит отметить, что после этого структура продолжает видоизменяться, однако при этом максимальное значение скорости течения в среднем сохраняется, а величина скорости в средней части слоя, под УЗИ, постепенно снижается.

Максимальная скорость свободной конвекции в средней части слоя, между опорами, при повышении мощности излучения достаточно быстро выходит на насыщение (рис. 2, в). Для съёмки с достаточно короткими выдержками (не больше 5 мс) и при минимальном усилении сигнала, регистрируемого цифровой камерой, предпочтительно освещать жидкость с мощностью $P_L > 400$ мВт ($P_L / P_{\max} > 0.4$). Как можно видеть из графика, максимальная скорость в этом диапазоне существенно не зависит от значения мощности.

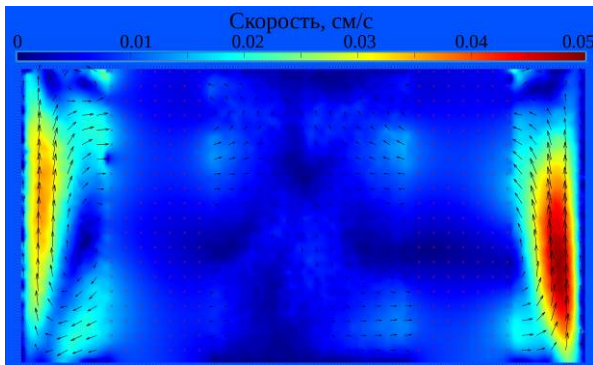


Рис. 3. Установившаяся конвективная структура при освещении лазером с мощностью 500 мВт

На практике, учитывая сравнительно низкую интенсивность тепловой конвекции, нет необходимости ждать окончательного установления фоновой структуры. При достаточно высокой интенсивности УЗ излучения по прошествии времени $t > 200$ с можно считать, что система вышла на рабочий режим. Альтернативный сценарий – проводить измерения в средней части слоя на коротком отрезке при $t < 30$ с, если этого времени достаточно для установления акустических течений. В насто-

ящих экспериментах был использован первый подход.

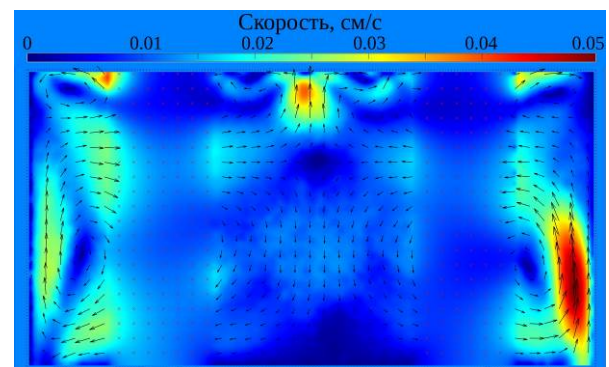
4. Акустические течения

При включении УЗ колебаний в слое жидкости возникают осреднённые течения. Можно выделить два принципиально различающихся типа течений. Первые существуют в непосредственном контакте с излучающей поверхностью – волноводом. Они характеризуются устойчивой и регулярной структурой, локализованной вблизи твёрдой границы. Вторые разворачиваются во всём объёме и показывают в целом довольно нестационарное поведение и часто нерегулярную структуру. Структура течений указывает на их трёхмерность, которая, впрочем, кажется очевидной для рассматриваемой постановки эксперимента.

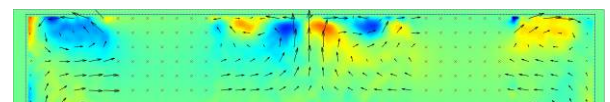
4.1. Локальные установившиеся осреднённые течения

Локальное течение имеет форму восходящего потока, направленного вдоль оси излучателя и окружённого системой вихрей (рис. 4). Вихри слева и справа от восходящего акустического потока имеют согласованную закрутку (рис. 4, б).

По своей интенсивности акустическое течение сопоставимо с тепловой конвекцией в целом, однако в области его локализации оно заметно превосходит последнюю (см. для сравнения рис. 3 и 4, а). Также из сравнения рисунков следует, что два симметричных вихря в нижних углах слоя на рис. 4, б имеют отношение к тепловой конвекции.



а



б

Рис. 4. Структура установившихся течений при интенсивности УЗ воздействия $I = 0.25$ Вт/см². Цвет обозначает: а – модуль скорости; б – завихренность

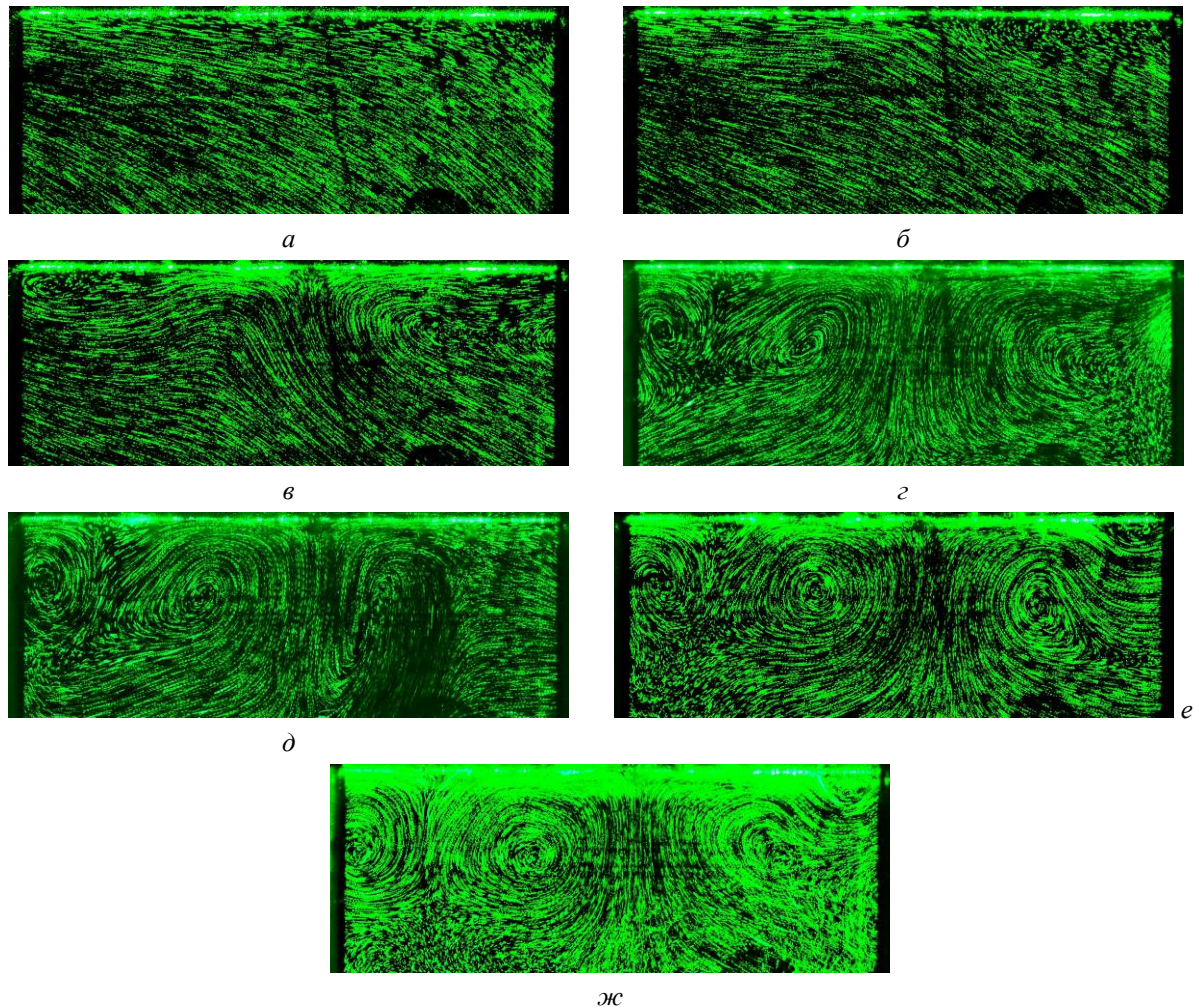


Рис. 5. Осреднённая структура локальных течений (фрагмент) вблизи УЗ излучателя (верхняя граница изображений) при $I = 0, 0.14, 0.28, 0.44, 0.58, 0.66, 0.83, \text{Вт/см}^2$ (а–ж, соответственно). Каждое изображение получено путём наложения 10 последовательных фотографий. Слева и справа видны фрагменты опор

По своему внешнему виду установившееся акустическое течение вблизи излучающей поверхности (рис. 4, а) напоминает осреднённое течение Шлихтинга под колеблющимся телом, погружённым в жидкость [16, 17]. Однако масштаб течения в настоящем эксперименте составляет порядка $(10^2\text{--}10^3)\delta$, что на один или два порядка превосходит характерные масштабы структур в цитируемых работах. Как следствие, более подробное сравнение кажется неоправданным.

При низкой интенсивности УЗ воздействия данное течение не наблюдается (рис. 5, б), но по мере повышения I постепенно приобретает регулярную форму (рис. 5, в–ж). Отметим, что на рис. 5 представлен фрагмент структуры течений, показывающий приблизительно верхнюю четверть

слоя по высоте и ограниченный опорами слева и справа. Рис. 5, а аналогичен фрагменту структуры на рис. 2, а, непосредственно под волноводом, тогда как рис. 5, е, к примеру, аналогичен фрагменту рис. 4. Скорость установившегося локального течения возрастает с интенсивностью УЗ излучения. Экспериментальные точки распределяются в удовлетворительном согласии с квадратичным законом (рис. 6). Этот результат качественно согласуется с теорией акустических течений, предсказывающей квадратичную зависимость между скоростью и амплитудой пульсаций давления [18]. Структура течения не претерпевает качественных изменений с повышением I . Скорость восходящего потока была измерена примерно на равном удалении от центров вихрей (рис. 5, в–ж).

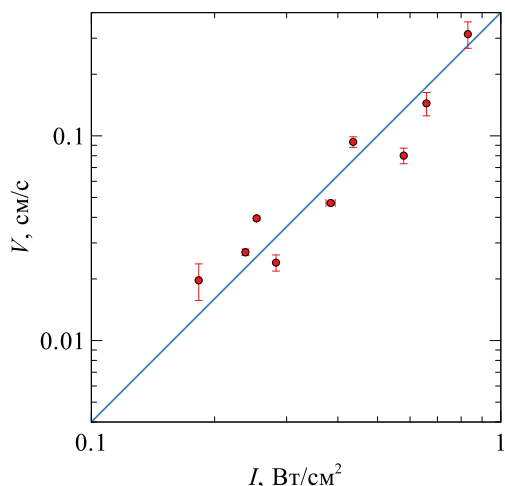


Рис. 6. Скорость осреднённых течений (проекция на ось колебаний) вблизи поверхности волновода в зависимости от интенсивности I

4.2. «Глобальные» течения

Одним из наиболее простых режимов акустических течений, захватывающих весь объём слоя, является струя, направленная вдоль оси излучения от волновода в объём (рис. 7). Данное течение можно назвать квазистационарным, поскольку оно трансформируется сравнительно медленно. Оно также обладает условной симметрией по отношению к оси излучения. Интересной особенностью, которую стоит отметить, является неоднозначность состояния исследуемой системы. Так, при одинаковых параметрах УЗ воздействия ($I \approx 0.25 \text{ Вт/см}^2$) может существовать либо локальное течение (рис. 4), либо «глобальное» (рис. 7). Возможно также сосуществование обоих режимов, когда под волноводом наблюдается менее интенсивная установившаяся структура, а в объёме – более интенсивная струя (рис. 8, а). Механизм выбора структуры остаётся непонятен, но стоит отметить, что заметно влияние предистории. «Глобальное» течение чаще формируется при высокой интенсивности УЗ. При понижении интенсивности уже сформировавшийся поток может продолжить существовать даже при сравнительно низких значениях I . Скорость «глобальных» течений на порядок выше, чем скорость локальных.

При дальнейшем повышении I «глобальные» течения становятся более нерегулярными. Течение часто трансформируется, а начала потоков в плоскости светового ножа могут располагаться в различных точках. Обратимся к рис. 8, а. На нём можно выделить три структуры акустической природы: установившееся течение непосредственно под излучателем, немного отклонённую от вертикали струю в средней части объёма и наиболее интенсивный поток, исходящий от правой стенки. На рис. 8, б можно заметить два интенсивных потока, исходящих от левой стенки и объединяющихся в

одну широкую струю, достигающую правой стенки. Подобного рода течения, начинающиеся в различных точках границ объёма, являются характерными для сравнительно высоких интенсивностей УЗ воздействия.

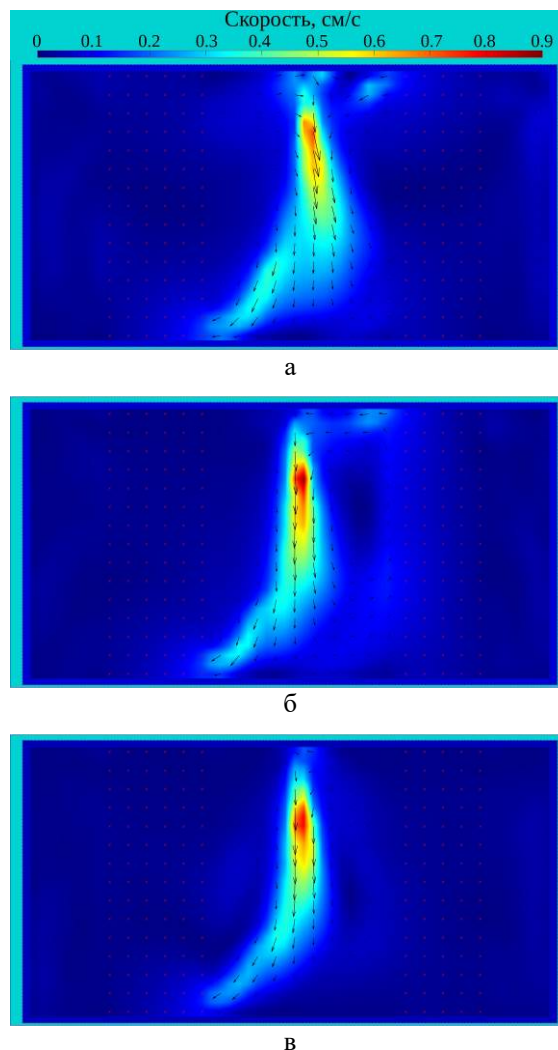


Рис. 7. Акустический поток в форме струи, направленной от излучателя вдоль его оси при $I = 0.24 \text{ Вт/см}^2$, в различные моменты времени. Время между соседними картинками (а–б, б–в) составляет 100 с

4.3. Обсуждение результатов

При анализе поведения акустических течений в рассмотренных экспериментах следует учесть две особенности. Во-первых, геометрия контейнера не соответствует пространственному резонансу, необходимому для существования стоячей волны. Во-вторых, высота слоя сопоставима по величине с длиной волны, и для маловязкой жидкости, как вода, это подразумевает, что колебания жидкости заполнят весь слой по высоте, поскольку затухание волн будет слабым. Как следствие, можно ожидать, что при достаточной интенсивности УЗ излучения практически во всём объёме сформиру-

ется поле давления, которое будет трансформироваться с течением времени.

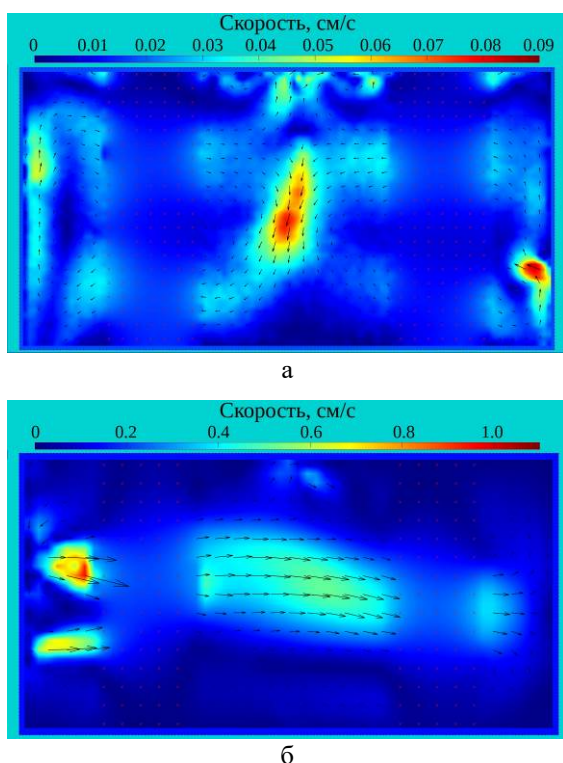


Рис. 8. Примеры нерегулярных, нестационарных структур, наблюдаемых при I : а – 0.38 Вт/см^2 ; б – 0.46 Вт/см^2

Сравнивая рис. 7 и 8, можно заметить сходство между началами потоков в форме струй на различных участках границ рабочей полости. Логичным кажется предположение, что перемещение начала струи связано со сложением падающей и отражённой волны, в результате которого получается поле давления с постепенно смещающимися узлами и пучностями. В экспериментах наблюдались ситуации, когда в объёме существовало несколько струй, и в зависимости от расположения последние либо усиливали друг друга, либо сталкивались.

5. Заключение

Экспериментально изучены акустические течения, генерируемые локальным источником ультразвукового излучения в ограниченном объёме маловязкой жидкости. Рассмотрена простая конфигурация эксперимента, при которой излучатель располагается сверху, а высота слоя не согласована с длиной волны. При сравнительно малой интенсивности УЗ колебаний наблюдаются течения, исходящие от излучателя. Такие течения бывают двух типов: стационарные, локализованные вблизи излучателя, и квази-стационарные, распространяющиеся на всю высоту слоя. При сравнительно высокой интенсивности колебаний наблю-

даются нестационарные течения, заполняющие весь объём жидкости. Они обладают двумя отличительными чертами: во-первых, их структура непрерывно трансформируется, а во-вторых, потоки могут брать начало не только вблизи излучателя, но и на других границах слоя. Кажется логичным, что переход от одного типа течений к другому обусловлен повышением вклада отражённых волн с ростом интенсивности. До тех пор, пока вклад поля давления излучённой волны является основным, структура будет «привязана» к излучателю. Когда амплитуда отражённых волн становится достаточной, они вносят изменения в результирующее поле давления, которое в силу несогласованности высоты слоя и длины волны непрерывно трансформируется. При этом потоки могут изменять своё направление и иметь несколько источников в плоскости светового ножа.

Помимо этого, в ходе исследования был протестирован волновод в форме тонкого диска, приводившийся в плотное соприкосновение с поверхностью излучателя посредством резьбового соединения. Толщина волновода устанавливалась заведомо меньше длины звуковой волны, характерной для его материала. Эксперименты показали, что такая конструкция эффективна для передачи колебаний в жидкость. Была изучена тепловая конвекция, возникавшая в качестве побочного эффекта при освещении слоя непрерывным лазерным световым ножом. Результаты указывают на то, что при выборе оптимального режима освещения нужно ориентироваться на характерную скорость течений, которую необходимо измерить.

Изученные в эксперименте течения являются одной из типичных проблем, препятствующих УЗ разделению эмульсий. Изучение этих течений является необходимой подзадачей при исследовании процессов деэмульгации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-41-596009).

Список литературы

1. 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
2. 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.
3. Gröschl M. Ultrasonic separation of suspended particles. Part I: fundamentals // *Acta Acust. United Ac.* 1998. Vol. 84. P. 432–447.
4. Crum L. A. Acoustic force on a liquid droplet in an acoustic stationary wave // *J. Acoust. Soc. Am.* 1971. Vol. 50. P. 157–163.

5. Nii S., Kikumoto S., Tokuyama H. Quantitative approach to ultrasonic emulsion separation // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2009. Vol. 16. Iss. 1. P. 145–149. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2008.07.005
6. 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
7. 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. P. 3237. DOI: 10.1121/1.4799373
8. Сахабутдинов Р. З., Судыкин А. Н., Губайдуллин Ф. Р. Исследование процесса обезвоживания сверхвязкой нефти при ультразвуковом воздействии // *Нефтяное хозяйство*. 2013. № 10. С. 116–119.
9. Судыкин А. Н., Губайдуллин Ф. Р., Шагеев Р. Х., Рафиков С. Б., Гиззатуллин Ф. С. Результаты пилотных испытаний технологии подготовки сверхвязкой нефти с применением ультразвукового коалесцента // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2014. № 6. С. 56–60.
10. 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. Iss. 6. P. 2151–2164. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2014.02.016
11. Красильников В. А., Крылов В. В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 403 с.
12. Eckart C. Vortices and streams caused by sound waves // *Physical Review*. 1948. Vol. 73. P. 68–76. DOI: 10.1103/PhysRev.73.68
13. Рэлей (Стрэтт Дж.В.). Теория звука. Т. 2. М.: ГИТТЛ, 1955. 476 с.
14. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 711 с.
15. 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
16. Иванова А. А., Козлов В. Г., Любимов Д. В., Любимова Т. П., Мераджи С., Ру Б. Структура осредненного течения, возбуждаемого вибрирующим телом с кромкой большой кривизны // *Изв. РАН. МЖГ*. 1998. № 5. С. 30–38.
17. Costalonga M., Brunet P., Peerhossaini H. Low frequency vibration induced streaming in a Hele-Shaw cell // *Phys. Fluids*. 2015. Vol. 27. P. 013101. DOI: 10.1063/1.4905031
18. Ниборг В. Акустические течения / под ред: Мэзон У. Физическая акустика. М.: Мир, 1969. Т. 2. Ч. Б. С. 302–377.

References

1. 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
2. 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.
3. Gröschl M. Ultrasonic separation of suspended particles – Part I: fundamentals. *Acta Acust. United Ac*, 1998, vol. 84, pp. 432–447.
4. Crum L. A. Acoustic force on a liquid droplet in an acoustic stationary wave. *J. Acoust. Soc. Am*, 1971, vol. 50, pp. 157–163.
5. 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
6. 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
7. 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, pp. 3237. DOI: 10.1121/1.4805171
8. Sakhabutdinov R. Z., Sudykin A. N., Gubaidulin F. R. Study of ultrasonic dehydration process for heavy oil. *Neft'anoe Khoz'aistvo*, 2013, no. 10, pp. 116–119. (in Russian)
9. Sudykin A. N., Gubaydulinn 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. *Oborudovaniye i tekhnologii dl'a n'eft'egazovogo kompleksa*, 2014, no. 6, pp. 56–60. (in Russian)
10. 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
11. Krasilnikov V. A., Krylov V. V. *Vvedeniye v fizicheskuyu akustiku*. Moscow: Nauka, 1984. 403 p. (in Russian)
12. Eckart C. Vortices and streams caused by sound waves. *Physical Review*, 1948, vol. 73, pp. 68–76. DOI: 10.1103/PhysRev.73.68

13. Rayleigh (Strutt J. W.). *The theory of sound. Vol. 2.* Creative Media Partners, LLC, 2018. 334 p.
14. Schlichting H. *Boundary Layer Theory.* New York, USA: McGraw-Hill, 1979. 817 p.
15. 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
16. Ivanova A. A., Kozlov V. G., Lyubimov D. V., Liubimova T. P., Meragy S., Roux B. Structure of averaged flow driven by a vibrating body with a large-curvature edge. *Fluid Dynamics*, 1998, vol. 33, no. 5, pp. 659–666.
17. Costalonga M., Brunet P., Peerhossaini H. Low frequency vibration induced streaming in a Hele-Shaw cell. *Phys. Fluids*, 2015, vol. 27, pp. 013101. DOI: 10.1063/1.4905031
18. Nyborg, W. L. Acoustic streaming. In: Mason, W. P. (ed.) *Physical Acoustics. Principles and Methods.* New York and London, Academic Press, 1965, vol. 2, part B, pp. 265–331.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

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

Please cite this article in English as:

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

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

Author information

1. *Nikolai V. Kozlov*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of RAS, Acad. Korolev Str. 1, 614068 Perm, Russia