Письма в ЖЭТФ, том 99, вып. 2, с. 94 – 98 © 2014 г. 25 января

Возбуждение колебаний границы несмешивающихся жидкостей импульсным ультразвуковым пучком, параллельным границе раздела

А. П. Брысев[1)], *В. Ю. Юров*[+ 1)]

Joint International Laboratory of critical and supercritical phenomena in functional electronics, acoustics and fluidics (LICS)

Научный центр волновых исследований, Институт общей физики им. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

[+]*Институт общей физики им. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 25 ноября 2013 г.

Для нескольких пар несмешивающихся жидкостей экспериментально обнаружена возможность возбуждения колебаний границы их раздела ультразвуковыми импульсами, распространяющимися параллельно этой границе. При этом плоский ультразвуковой излучатель расположен так, что граница раздела жидкостей делит его апертуру пополам. Приведены результаты наблюдений эволюции формы колебаний границы при изменении амплитуды и длительности импульсов возбуждения, а также расстояния от излучателя. Выявлена возможность возбуждения различных мод колебаний границы раздела, находящихся в ограниченном объеме.

DOI: 10.7868/S0370274X14020064

Введение. Динамика движения границы раздела жидкостей или жидкости и газа под действием внешней силы представляет большой интерес как для фундаментальных дисциплин, таких, например, как общая теория колебаний и волн, гидромеханика многокомпонентных и многофазных сред и эмульсий, так и для развития прикладных исследований при разработке современных технологий в химической, аэрокосмической, пищевой и фармацевтической промышленности, технологий транспорта жидких продуктов, в биомедицине. Особый интерес вызывает физика возбуждения и распространения внутренних волн океана, вовлеченных в процессы перемешивания его верхнего слоя, консервации и переноса энергии в динамике глобального климата.

Одним из видов внешнего воздействия, вызывающего движение границы раздела указанных сред, может выступать сила радиационного давления ультразвукового пучка [1], падающего на границу по нормали. Данное явление достаточно хорошо изучено как теоретически [2], так и экспериментально [3]. Под действием этой силы граница смещается вверх или вниз (в зависимости от знака радиационной силы) тем больше, чем больше интенсивность ультразвука. Измеряя величину такого смещения для не слишком большой интенсивности ультразвукового пучка, можно оценить ее величину и пространственное распределение (см., например, [4]). При большой интенсивности ультразвука возникает так называемое ультразвуковое фонтанирование [5], которое используется для распыления жидкостей и коагуляции аэрозолей.

В настоящей работе сообщается о первых (насколько нам известно) результатах, полученных в экспериментах по возбуждению колебаний границы раздела двух несмешивающихся жидкостей в принципиально новой схеме, а именно с помощью импульсов ультразвукового пучка, распространяющегося не перпендикулярно, а параллельно границе раздела. При этом плоский ультразвуковой излучатель расположен так, что граница раздела жидкостей делит его апертуру пополам. В такой геометрии сила радиационного давления ультразвука направлена параллельно границе. Казалось бы, смещения последней в этом случае возникать не должно. Однако, как показывают полученные экспериментальные результаты, возбуждение колебаний границы таким способом оказывается не только возможным, но и достаточно эффективным.

Экспериментальная установка и методика измерений. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1 (там же приведена фотография ее основного фрагмента). В пластиковую кювету прямоугольного сечения 47.5×19 мм^2 высотой 70 мм с толщиной стенок 0.5 мм заливались несмешивающиеся между собой силиконовое масло (скорость

[1)]e-mail: brysev@ya.ru, yurov@kapella.gpi.ru

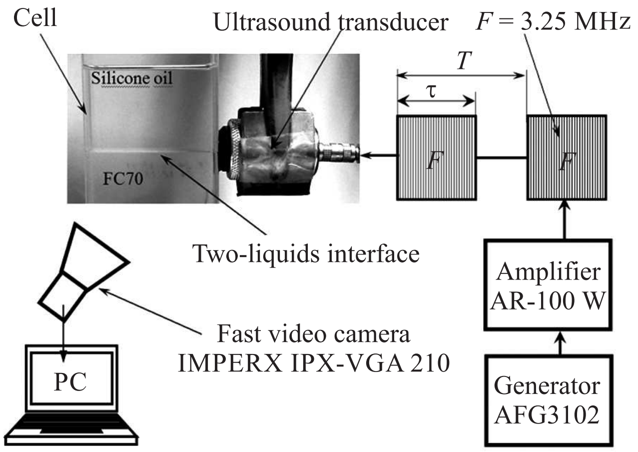

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

звука 919 м/с, плотность 853 кг/м^3) и перфтортриамиламин флюоринерт FC70 производства компании 3M (скорость звука 687 м/с, плотность 1940 кг/м^3). При этом из-за большей плотности жидкость FC70 оказывалась снизу. Объемы жидкостей были почти одинаковыми: граница между ними находилась на высоте 32 мм. При этом уровень силиконового масла над границей составлял 29 мм. С внешней стороны одной из боковых (размером 70 × 19 мм^2) стенок кюветы устанавливался ультразвуковой пьезопреобразователь типа П111 (диаметр пьезоактивного элемента 20 мм) так, что граница раздела жидкостей делила его апертуру пополам. В качестве акустической склейки между пластиковой стенкой кюветы и поверхностью преобразователя использовался гель Couplant SWC, lot # 08154 производства Sofranel (Франция). Соотношение размеров кюветы, положение преобразователя, размер его апертуры, а также полученные результаты (см. далее) позволяют в большинстве случаев рассматривать возбуждение колебаний границы раздела жидкостей как одномерный процесс.

Радиоимпульсы, подававшиеся на преобразователь для излучения в объем кюветы ультразвука, формировались в генераторе Tektronics AFG3102 с несущей частотой 3.25 МГц (соответствующей центральной частоте преобразователя) и усиливались в широкополосном усилителе Amplifier Research Model 100A400 с коэффициентом усиления не менее 50 дБ и номинальной выходной мощностью 100 Вт. Длительность радиоимпульсов τ варьировалась в пределах от 0.3 до 100 мс, амплитуда U (на выходе AFG3102) – от 37 до 1100 мВ, период следования T составлял от 200 мс и более. При этом характерная оценка максимального значения импульсной интенсивности ультразвука в кювете составила величину порядка 10 Вт/см^2. Регистрация движений границы раздела жидкостей осуществлялась с помощью высокоскоростной видеокамеры IMPERX IPX-VGA 210, которая работала в режиме записи 200 кадров/с с разрешением 640 × 480 пикселей. Такие значения параметров регистрации рассматриваемого явления позволяли детально фиксировать временную и пространственную динамику движения границы раздела жидкостей под действием ультразвуковых импульсов. Оптическая ось камеры была направлена перпендикулярно оси преобразователя и стенке кюветы с размерами 70 × 47.5 мм^2. Серия из последовательных кадров, записанная видеокамерой в ходе того или иного эксперимента, в цифровом виде передавалась в компьютер для хранения и обработки. Характерное время записи составляло от полутора до трех секунд. Соответственно каждая серия содержала от трехсот до шестисот кадров. Анализ записанных кадров проводился с использованием программы обработки изображений ImageJ. С ее помощью можно измерять не только амплитуду колебаний границы в любой ее точке, но и их временную форму.

Результаты и обсуждение. Прежде всего отметим, что если преобразователь располагался выше или ниже границы раздела жидкостей так, что он излучал ультразвук только в одну из них, то при прочих равных условиях движения границы не наблюдалось. Следовательно, наличие границы двух жидких сред, делящей ультразвуковой пучок вдоль его оси пополам, принципиально необходимо для того, чтобы с его помощью можно было нарушить устойчивость границы раздела несмешивающихся жидкостей. Вызывать движение границы в такой геометрии может несколько факторов. Один из них связан с тем, что акустические характеристики (плотность, затухание и скорость звука, нелинейные параметры) в контактирующих жидкостях отличаются. Поэтому акустическое поле, задаваемое плоским излучателем, эволюционирует различным образом по обе стороны от границы. Кроме того, поскольку длительность ультразвукового импульса много больше, чем время двойного пробега звука по кювете, можно считать (пренебрегая затуханием, не 100-процентным отражением звука от стенок кюветы и не точным равенством ее длины целому числу полуволн), что в ней по обе стороны от границы раздела устанавливаются стоячие волны с разной длиной волны. По этим причинам вдоль границы должны возникать локальные области с большим вертикальным градиентом давления. Поскольку граница не является жесткой, она будет прогибаться вниз или вверх в зависимости

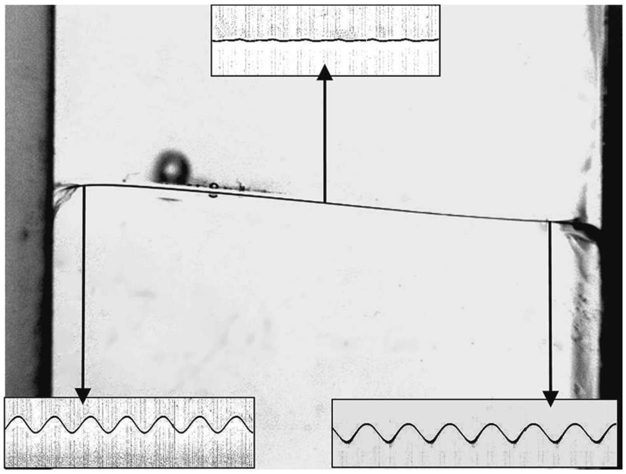

Рис. 2. Фотография, иллюстрирующая ультразвуковое возбуждение несимметричной моды колебаний поверхности раздела несмешивающихся жидкостей (FC70 – внизу, силиконовое масло – вверху). На вставках показана временная зависимость смещения границы раздела для тех ее точек, из которых выходят стрелки. Ультразвуковой преобразователь находится справа (не показан). Параметры возбуждения: амплитуда напряжения на выходе генератора 0.1 В, длительность импульса 92 мс, период следования импульсов 280 мс. Амплитуда колебаний поверхности около стенок составила 1.1 мм

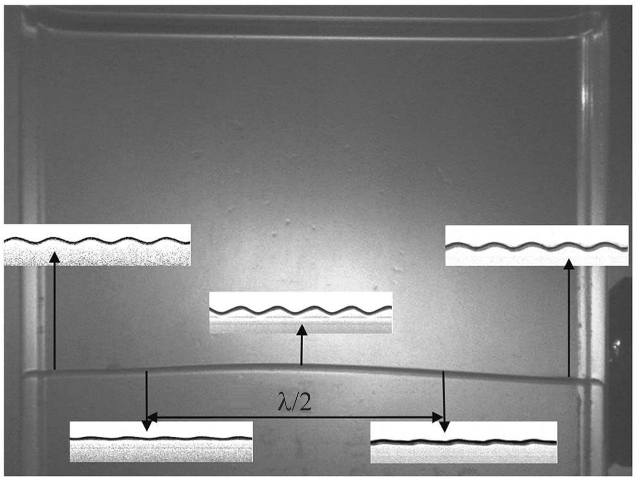

Рис. 3. Фотография, иллюстрирующая ультразвуковое возбуждение симметричной моды колебаний поверхности раздела несмешивающихся жидкостей (FC70 – внизу, силиконовое масло – вверху). На вставках показана временная зависимость смещения границы раздела для тех ее точек, из которых выходят стрелки. Ультразвуковой преобразователь находится справа (черная область справа от кюветы). Параметры возбуждения: амплитуда напряжения на выходе генератора 0.2 В, длительность импульса 30.8 мс, период следования импульсов 290 мс

от знака градиента давления в данном месте. В местах изгибов направление радиационной силы уже не будет параллельно поверхности раздела жидкостей. Возникнет ее нормальная компонента, вызывающая дальнейшее смещение границы по вертикали. Этот процесс будет развиваться по нарастающей до тех пор, пока, с одной стороны, длится ультразвуковое воздействие, а с другой – радиационная сила не уравновешивается силой тяжести и силой поверхностного натяжения. Другим фактором, способным вызывать смещение границы в параллельном ей ультразвуковом пучке, служит поверхностное натяжение, из-за которого граница жидкостей всегда является искривленной на стенках кюветы. Сила радиационного давления, действуя на искривление, также будет приводить к его росту. Понятно, что решение вопроса о физическом механизме возбуждения колебаний границы в указанных условиях требует развития соответствующих аналитических и численных моделей, а также проведения дополнительных экспериментов, что, однако выходит за рамки данного краткого сообщения.

Приводимые здесь экспериментальные результаты имеют качественный характер. (Для получения количественных результатов в разных режимах возбуждения необходимо, в частности, повысить точность измерений амплитуды колебаний поверхности раздела жидкостей при малых амплитудах возбуждающего ультразвука.) В этих первых экспериментах выяснялась возможность возбуждения различных мод колебаний, а также изучалась влияние интенсивности и энергии возбуждающего ультразвукового пучка на временную форму и пространственное распределение смещений при колебаниях границы раздела жидкостей.

В проведенных экспериментах отчетливо наблюдалось возбуждение двух мод в зависимости от значений параметров ультразвуковых импульсов. Рис. 2 иллюстрирует возбуждение несимметричной моды. Эта мода имеет максимальную амплитуду колебаний вблизи стенок кюветы и узел в ее центре, причем колебания у стенок противофазны. Как видно, пространственное распределение смещений в этой моде характеризуется близким к линейному нарастанием амплитуды от центра к стенкам кюветы, т.е. при колебаниях линия границы раздела жидкостей остается практически прямой. Возбуждение данной моды происходило при следующих параметрах импульсов, подаваемых на излучатель: длительность $\tau = 92$ мс, период следования $T = 280$ мс, амплитуда на выхо-

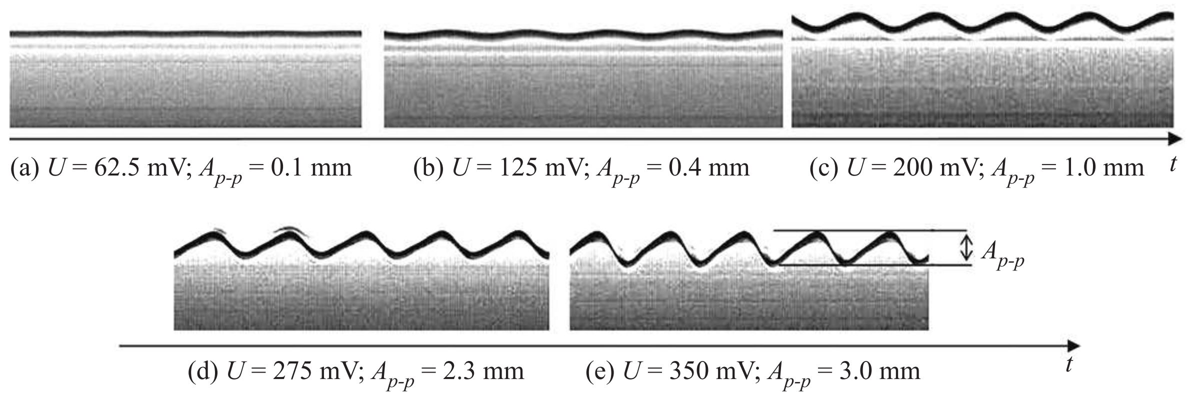

Рис. 4. Эволюция временной формы и размаха колебаний A_{p-p} в среднем сечении симметричной моды, показанной на рис. 3, в зависимости от амплитуды напряжения U на выходе генератора (т.е. от начальной интенсивности ультразвуковых импульсов). Параметры импульсов: несущая частота 3.25 МГц, длительность 30.8 мс, период следования 290 мс

де генератора $U = 0.1$ В. Амплитуда колебаний при указанных значениях параметров составила 1.1 мм.

На рис. 3 показана другая, симметричная мода, имеющая три пучности (вблизи стенок кюветы и в ее центре) и два узла между центральной и боковыми пучностями. Колебания в ее центральной пучности противофазны синфазным колебаниям в боковых пучностях. В отличие от несимметричной моды пространственное распределение смещений в такой симметричной моде близко к косинусоидальному. Возбуждение этой моды происходило при следующих параметрах импульсов, подаваемых на излучатель: длительность $\tau = 30.8$ мс, период следования $T = 290$ мс, амплитуда на выходе генератора $U = 200$ мВ. Форма колебаний при указанных значениях параметров близка к гармонической с амплитудой 0.5 мм. Измерения, сделанные по фотографиям, показали, что длина волны этой моды практически равна внутренней длине кюветы (47.5 мм). Отметим, что для обеих мод (см. рис. 2 и 3) частота колебаний поверхности раздела $f = 1/T$, как и должно быть при вынужденных колебаниях.

Наблюдения эволюции временной формы и размаха колебаний в зависимости от энергетических параметров ультразвуковых импульсов проводились в среднем сечении кюветы в центральной пучности показанной на рис. 3 симметричной моды. Качественное поведение зависимостей временной формы колебаний от амплитуды напряжения U на выходе генератора (а значит, от начальной интенсивности ультразвука) и длительности ультразвукового импульса τ оказалось схожим, поэтому на рис. 4 приведена только первая из них. Видно, что с ростом U размах колебаний границы раздела жидкостей растет. При этом гармонический характер колебаний (рис. 4a–c) сменяется нелинейным с переходом синусоидальной формы колебаний в пилообразную (рис. 4d–e). Характерное время установления стационарной амплитуды колебаний составляет 2–3 периода следования ультразвуковых импульсов. Максимальная величина размаха пилообразных колебаний достигает 3.0 мм.

Отметим, что возбуждение колебаний границы раздела жидкостей в рассматриваемой геометрии эксперимента наблюдалось и для других пар жидкостей (вода–масло, вода–бензин), находящихся в кюветах из оптического кварцевого стекла прямоугольного сечения различных размеров. Кроме того, использовались пьезоизлучатели с другими рабочими частотами в диапазоне 1–5 МГц и апертурами от 10 до 20 мм.

Полученные результаты показывают, что можно не только возбуждать различные моды колебаний границы раздела несмешивающихся жидкостей, но и эффективно управлять их характеристиками.

Заключение. В настоящей работе экспериментально обнаружен и апробирован новый способ возбуждения колебаний границы раздела несмешивающихся жидкостей – за счет действия импульсов ультразвукового пучка, распространяющегося *параллельно* границе раздела, которая делит пучок пополам. Показано, что такой способ возбуждения оказывается эффективным, обеспечивая генерацию не только гармонических колебаний интерфейса с малой амплитудой, но и нелинейных колебаний достаточно большой амплитуды. Важно, что с помощью такого метода можно возбуждать различные моды колебаний поверхности раздела жидкостей и эффективно управлять параметрами колебаний. Полученные результаты не только представляют самостоятельный физический интерес, стимулируя развитие соответствующих теоретических и экспериментальных исследований (например, экспериментальное моделирование процессов возбуждения внутренних волн океана тектоническими колебаниями береговой линии), но и могут оказаться полезными для ряда применений данного явления в различных технологических процессах.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Marie Curie International Research Staff Exchange Scheme Fellowship within the 7th European Community Framework Programme (IRSES), project “Patterns and Surfaces”, # 269207, а также гранта поддержки МАЛ РФФИ. Авторы выражают благодарность доктору Фарзаму Зуештиаг (PhD Farzam Zoueshtiagh, France) за помощь в проведении экспериментов, а также проф. В.Л. Преображенскому (НЦВИ ИОФ РАН – LICS) и д.ф.-м.н. С.М. Першину (НЦВИ ИОФ РАН) за полезные обсуждения.

1. *Nonlinear Acoustics*, ed. by M. F. Hamilton and D. T. Blackstock, Academic Press, Boston (1998), Ch. 6.
2. В. А. Ананьев, В. И. Домаркас, С. И. Саяускас, Акуст. журн. **30**, 1 (1984)
3. R. Reibold, Ultrasonics **18**, 85 (1980).
4. Б. А. Агранат, М. Н. Дубровин, Н. Н. Хавский, Г. И. Эскин, *Основы физики и техники ультразвука*, Высшая школа, М. (1987).
5. Л. Бергман, *Ультразвук и его применение в науке и технике*, под ред. В. С. Григорьева и Л. Д. Розенберга, Изд-во Иностр. лит., М. (1957).