

Неустойчивость низкочастотной гравитационно-капиллярной волны под действием стационарного ультразвука

Л. М. Крутянский^{+*1)}, В. Л. Преображенский^{+*}, Ф. Перно^{+*2)}

⁺ Joint International Laboratory LIA LICS

^{*} Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

[×] Université de Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Université de Valenciennes, UMR 8520 – IEMN, F-59000 Lille, France

Поступила в редакцию 5 сентября 2019 г.

После переработки 17 октября 2019 г.

Принята к публикации 18 октября 2019 г.

В условиях облучения поверхности жидкости непрерывным плоским ультразвуковым пучком постоянной амплитуды обнаружен новый вид неустойчивости стоячих гравитационно-капиллярных волн. При интенсивности ультразвука с частотой 1.03 МГц, превышающей определенное пороговое значение, наблюдается возбуждение одной из собственных мод гравитационно-капиллярных волн с частотой 6.56 Гц. Время установления стационарной амплитуды колебания поверхности значительно превосходит собственное время релаксации моды и уменьшается с ростом надкритичности. Сценарий развития неустойчивости подобен обратному энергетическому каскаду.

DOI: 10.1134/S0370274X19220053

1. Введение. Известные виды неустойчивости гравитационно-капиллярных волн (ГКВ), как правило, носят параметрический характер и возникают в условиях нестационарного воздействия на жидкую среду. Так классическая неустойчивость Фарадея наблюдается на поверхности или на границе раздела жидкостей при переменном вертикальном ускорении среды как целого [1, 2]. Переменное ускорение модулирует собственную частоту ГКВ, что приводит к развитию параметрической неустойчивости. Неустойчивость может развиваться и в условиях переменного ускорения в горизонтальном направлении, параллельном поверхности раздела [3]. На ультразвуковых частотах параметрическое возбуждение ГКВ возникает как в результате колебаний среды в соответствии с механизмом Фарадея [4, 5], так и вследствие переменного акустического воздействия на границу раздела сред. Например, в работе [6] наблюдалось возбуждение капиллярных волн, обусловленное ультразвуковой модуляцией кривизны мениска в капилляре. В работе [7] исследована возможность взрывного параметрического возбуждения ГКВ переменным радиационным давлением ультразвука на поверхность жидкости. Условием развития неустойчивости во всех указанных случаях является переменное воздействие на среду с частотой

того же порядка величины, что и частота возбуждаемых ГКВ, а механизм неустойчивости представляет собой прямое когерентное взаимодействие ГКВ с накачкой. В системах вихревых структур на поверхности жидкости наблюдаются каскадные процессы возбуждения с переносом энергии по пространственному спектру ГКВ [8–10]. Особый интерес представляет относительно редкое явление обратного энергетического каскада, в результате которого мелко-масштабные стохастические структуры трансформируются в устойчивые когерентные длинноволновые возбуждения.

В настоящем сообщении приведены результаты наблюдения неустойчивости ГКВ, вызванной ультразвуковой волной с частотой, на пять порядков превосходящей частоту возбуждаемой ГКВ, и интенсивностью, неизменной во времени. Наблюдаемый процесс генерации длинноволновой ГКВ носит ярко выраженный пороговый характер и проявляется подобно обратному энергетическому каскаду.

2. Установка и метод. Эксперимент проводился с жидкостью, помещенной в стеклянную кювету с внутренними размерами $50 \times 18 \times 30$ мм³ по X , Y и Z , соответственно (см. рис. 1). Снаружи к дну кюветы был приклеен плоский прямоугольный пьезо-керамический ультразвуковой излучатель размерами 50×20 мм² с центральной частотой рабочей полосы 1.03 МГц. Кювета была заполнена до уровня 12 мм жидким перфлюорогексаном (*Perfluorohexane*)

¹⁾ e-mail: leonid.krut@kapella.gpi.ru

²⁾ P. Pernod.

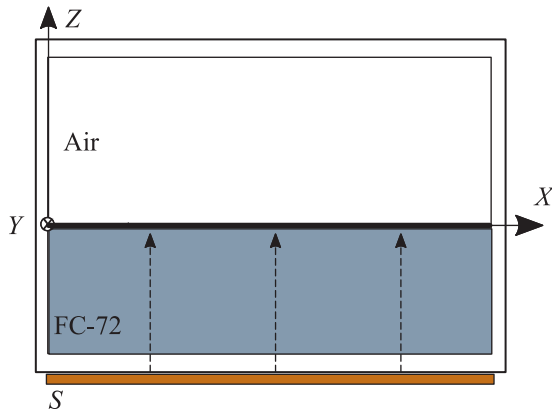


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема эксперимента. S – излучатель, штриховыми стрелками условно показано направление распространения ультразвука

FC-72. Это стабильная, инертная, прозрачная, нетоксичная жидкость, имеющая при нормальных условиях плотность $\rho = 1680 \text{ кг/м}^3$, сравнительно малый коэффициент поверхностного натяжения ($\sigma \approx 10^{-2} \text{ Н/м}$) и низкую вязкость ($\nu \approx 0.4 \text{ сСт}$ или $\eta \approx 6.9 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$). Совокупность этих свойств делает ее одним из удобных тестовых объектов для экспериментов в области механики жидкостей.

Регистрация колебаний поверхности жидкости выполнялась с помощью камеры Vieworks VC-2МС, осуществлявшей съемку кюветы через ее большую боковую грань. Скорость съемки составляла 100 кадров в секунду, при максимальном размере изображения 2048×1088 пикселей. При оптимальной настройке оптики точность измерений была 180 пикселей на мм или 5.5 мкм на один пиксель. Для количественной характеристики наблюдаемых гравитационно-капиллярных колебаний в получаемых покадровых изображениях выделялось определенное вертикальное сечение x_0 и на нем определялась точка положения поверхности жидкости (z координата). Последовательность z координат в точке x_0 , снятая по всем кадрам, позволяла построить функцию вертикального смещения поверхности во времени $\zeta(x_0, t)$. С этой целью сначала с помощью программного пакета ImageJ выполнялось накопление вертикальных сечений всей последовательности кадров и представление ее в виде двумерного массива. В полученном массиве каждый столбец являлся сечением кадра, номер столбца соответствовал номеру кадра, а элементы массива представляли собой целые числа градаций уровня серого от 0 до 255. Этот графический массив переводился в функцию $\zeta(x_0, t)$ с помощью алгоритма выделения контрастной (темной) точки поверхности и нахождения ее координат по z и по t .

После чего с помощью дискретного преобразования Фурье выполнялся анализ спектра колебаний. Время наблюдения обычно составляло около 200 с, что соответствовало разрешению в спектре 0.005 Гц.

Сигнал возбуждения подавался на ультразвуковой пьезопреобразователь от генератора Sony Tektronix AWG2021 через усилитель мощности (ENI 315). Использовались два вида возбуждения – монохроматическое, на частоте 1.03 МГц, и линейно частотно модулированное (ЛЧМ) с периодической модуляцией. Максимальная интенсивность ультразвука в обоих случаях составляла около 0.25 Вт/см^2 . В случае ЛЧМ период модуляции составлял 1 мс при девиации частоты 20 кГц. Отметим, что данные параметры укладывались в рабочую полосу преобразователя и не вызывали заметной амплитудной модуляции ультразвука. Для расчета частоты собственных мод ГКВ использовалось дисперсионное соотношение, учитывающее конечную глубину жидкого слоя h и поверхностное натяжение σ [11]:

$$\omega^2 = \left(gk + \frac{\sigma k^3}{\rho} \right) th(kh), \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, $k = \omega/v$ – волновое число, v – фазовая скорость, g – ускорение силы тяжести, ρ – плотность жидкости. Учитывая приведенные выше параметры жидкости, для рассматриваемых в эксперименте частот $< 20 \text{ Гц}$ вклад вязкости в спектр ГКВ пренебрежимо мал и потому может быть опущен в расчетах.

Результаты и обсуждение. При возбуждении ультразвукового преобразователя монохроматическим сигналом поверхность жидкости приобретала вид сложной хаотически осциллирующей мелкой структуры с характерными размерами около $\sim 0.5\text{--}1 \text{ мм}$ (см. фото на рис. 2а). Происхождение такой структуры может объясняться неоднородностью радиационного давления ультразвука на поверхность жидкости и кавитационными эффектами. Неоднородность обусловлена интерференцией волн в ближней зоне излучателя и возбуждением волн Лэмба в излучающей пластине [12]. В условиях монохроматического излучения картина наблюдаемых колебаний качественно не менялась с течением времени, сохраняя свою хаотическую пространственно-временную структуру. При возбуждении излучателя ЛЧМ сигналом с указанными выше параметрами динамика наблюдаемого процесса приобретала качественно иной вид: 1. Мелкая структура первично наблюдаемых колебаний сглаживалась, смещаясь в область более длинных волн и меньших амплитуд. 2. С течением времени наблюдалось развитие колебаний, со-

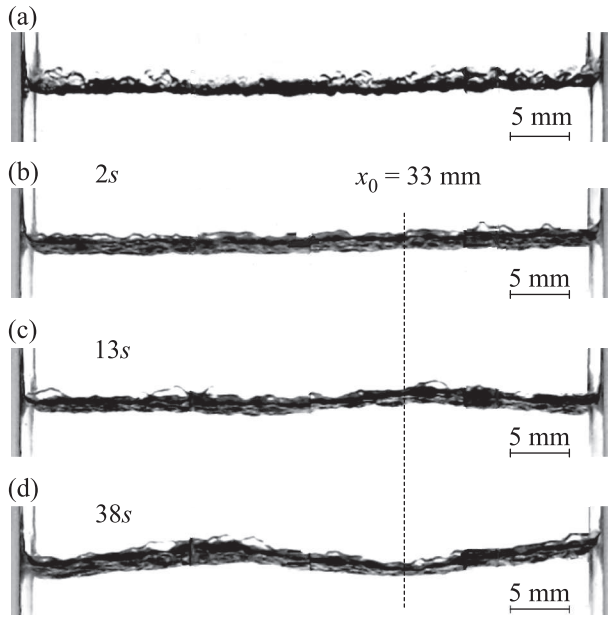


Рис. 2. Фотографии поверхности при различных режимах ультразвукового облучения. (а) – Немодулированный ультразвук. (b)–(d) – Последовательные стадии развития колебаний при частотной модуляции ультразвука. Указано время от начала возбуждения. Штриховой линией обозначено вертикальное сечение для нахождения функции смещения поверхности во времени

ответствующих третьей моде стоячих ГКВ, в которой на ширине кюветы укладываются три полуволны. Амплитуда регистрируемой моды ГКВ достигала единиц миллиметров. Изображения поверхности в различные моменты времени для случая частотно модулированного возбуждения представлены на рис. 2b–d. Переход от начального состояния слабых хаотических возмущений поверхности (рис. 2b) к устойчивым колебаниям третьей моды ГКВ (рис. 2d) занимал несколько десятков секунд при собственном времени релаксации моды около двух секунд. На промежуточной стадии, наряду с зарождающейся третьей модой, можно было наблюдать нестационарное возмущение в виде бегущей уединенной волны с пространственным масштабом около 15 мм, распространяющейся влево-вправо от одной стенки кюветы к другой (см. правую часть рис. 2c). На рисунке 3 построена измеренная зависимость положения координаты максимума переходного нестационарного возмущения от времени. Видно, что возмущение движется со скоростью ≈ 0.214 м/с.

На рисунке 4 показан процесс развития колебаний во времени при максимальной амплитуде возбуждения излучателя $U = 49$ В. Функция смещения поверхности $\zeta(x_0, t)$ измерялась в сечении, обозна-

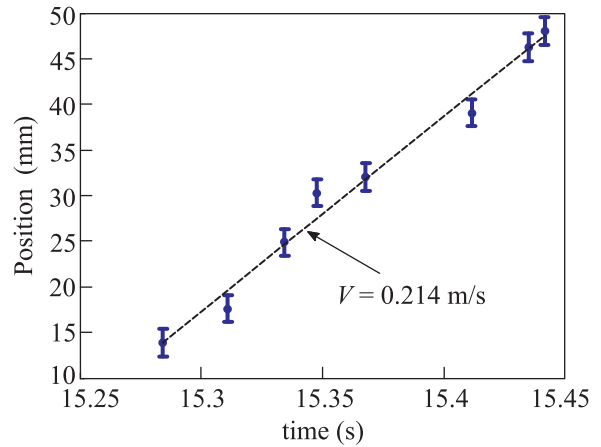


Рис. 3. (Цветной онлайн) Смещение точки максимума бегущего возмущения во времени. Интервалом изображена величина ошибки измерений. Штриховой линией построена линейная аппроксимация

ченном штриховой линией на рис. 2b–d ($x_0 = 33$ мм), что соответствовало 2/3 ширины кюветы и максимуму третьей моды ГКВ.

На рисунке 5 показана рассчитанная по соотношению (1) теоретическая дисперсионная зависимость ГКВ в кювете и спектр наблюдаемых колебаний для функции $\zeta(x_0, t)$, приведенной на рис. 4. Частота ГКВ на рис. 5a представлена в функции длины волны, точками изображены дискретные значения, соответствующие пространственным гармоникам по ширине кюветы (ось x). Номер моды при этом равен номеру точки, считая справа налево. Третья мода имеет длину волны $\lambda_3 = 33.3$ мм и расчетную частоту $f_3 = 6.77$ Гц. Максимальная измеренная спектральная компонента на рис. 5b имеет частоту 6.558 Гц. Незначительное расхождение в значениях частот может объясняться неучтенными в расчетах эффектами, например, наличием мениска у боковых стенок и нелинейным сдвигом частоты, присущим ГКВ. Примечательно, что фазовая скорость ГКВ с длиной волны, соответствующей третьей моде, равная 0.218 м/с, близка к измеренной скорости уединенной волны (рис. 3), наблюдаемой на начальной стадии развития неустойчивости.

Точками на рис. 4a изображена амплитуда третьей моды, вычисленная на небольшом временном интервале. Для этого все время наблюдения в 200 с было разбито на 80 интервалов по 2.5 с, и в каждом интервале находилась компонента спектра на частоте 6.56 Гц. Зависимость амплитуды третьей моды от времени хорошо воспроизводит ход огибающей функции $\zeta(x_0, t)$, таким образом можно считать, что

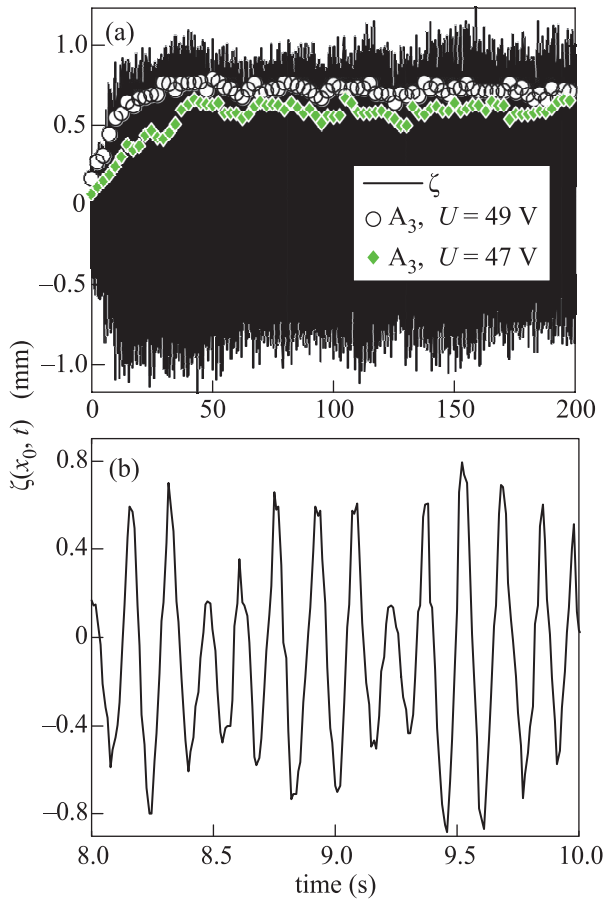


Рис. 4. (Цветной онлайн) Функция смещения поверхности $\zeta(x_0, t)$ в точке $x_0 = 33$ мм при амплитуде возбуждения $U = 49$ В: (а) – весь интервал времени наблюдения; (б) – пример волновой формы на коротком интервале вблизи момента времени $t = 8$ с. Точками на рисунке (а) показаны амплитуды третьей моды $A_3(x_0, t)$ для двух значений напряжения U на излучателе (49 и 47 В)

амплитуда данной функции практически определяется амплитудой третьей моды ГКВ.

Генерация моды ГКВ имела явно выраженный пороговый характер по уровню амплитуды напряжения на излучателе, что демонстрируется на рис. 6. При уменьшении амплитуды напряжения уменьшались как величина установившейся амплитуды колебаний, так и скорость выхода на ее стационарное значение. Развитие процессов во времени для двух значений возбуждающей амплитуды напряжения на излучателе приведено точками на рис. 4а. Ниже некоторой критической величины возбуждения (в экспериментах около 40 В), процесс генерации не развивался в течение всего времени наблюдения 200 с. Регистрируемая при этом остаточная спектральная компонента на частоте третьей моды была прак-

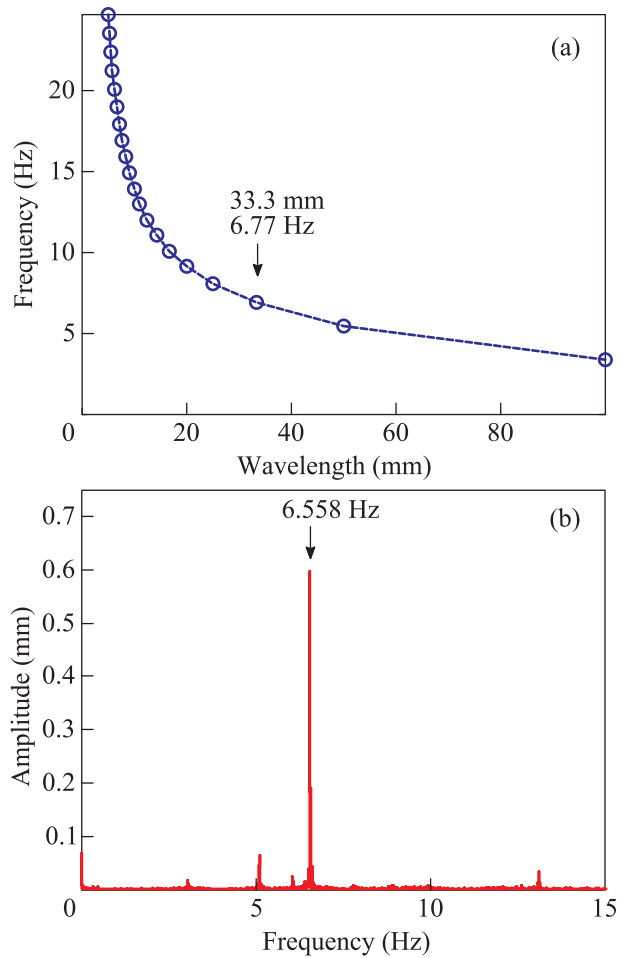


Рис. 5. (Цветной онлайн) Расчет дисперсии поперечных мод ГКВ в кювете (а) и спектр наблюдаемых колебаний (б). Стрелкой обозначена третья мода

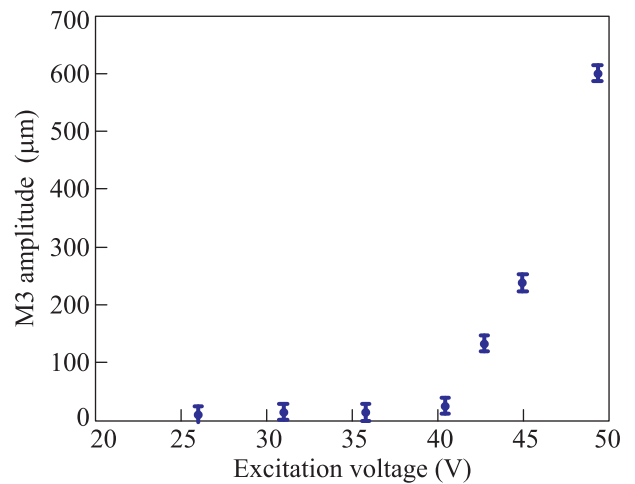


Рис. 6. (Цветной онлайн) Зависимость амплитуды третьей моды от напряжения возбуждения излучателя. Интервалом изображена величина ошибки измерений

тически неразличимой на уровне шумов. Особенностью рассматриваемого процесса является существенное отличие пространственно-временных масштабов неоднородности ультразвукового источника возбуждений (радиационного давления) и мелкомасштабных возмущений с одной стороны и длинноволнового когерентного колебания ГКВ с другой. Одним из механизмов генерации длинноволновых ГКВ могли бы быть крупномасштабные акустические течения. Однако условия возникновения таких течений не зависят от наличия или отсутствия частотной модуляции ультразвука заданной интенсивности. Соответственно, и генерация ГКВ должна была бы наблюдаться как в условиях ЛЧМ, так и в монохроматическом режиме возбуждения, что не согласуется с экспериментом. В то же время, частотная модуляция изменяет мелкомасштабное неоднородное распределение интенсивности ультразвука в ближнем поле и, как следствие, влияет на пространственный масштаб возбуждаемых хаотически колеблющихся структур на поверхности жидкости. Последующее возбуждение когерентного длинноволнового колебания поверхности может формироваться подобно обратному энергетическому каскаду. Применимость такого сценария к рассматриваемой неустойчивости требует специального исследования.

Заключение. Представленные экспериментальные результаты демонстрируют возникновение неустойчивости стоячей ГКВ в стационарных условиях облучения поверхности жидкости высокочастотным ультразвуком постоянной амплитуды. При симметричном распределении интенсивности ультразвука относительно сагиттального сечения структуры возбуждается мода ГКВ с нечетным пространственным распределением смещения по поверхности. Возбуждение имеет ярко выраженный порог по амплитуде ультразвука. С ростом надкритичности стационарный уровень амплитуды ГКВ возрастает, а время выхода на стационарный режим уменьшается. Такая динамика типична для

параметрической неустойчивости, однако условия для развития известных прямых параметрических механизмов в данном случае отсутствуют. В свою очередь, первоначальное возбуждение коротковолновых хаотических колебаний с последующей генерацией регулярной крупномасштабной стоячей волны типичны для процессов обратного энергетического каскада. Динамический механизм наблюдаемой неустойчивости отличается от известных и составляет предмет дальнейшего исследования.

Работа выполнена при поддержке проекта Российского фонда фундаментальных исследований # 18-52-16001, программы Президиума РАН # 5 “Фотонные технологии в зондировании неоднородных сред и биообъектов”.

1. T. B. Benjamin and F. Ursell, Proc. Royal Soc. Lond. Ser. A **225**(1163), 505 (1954).
2. K. Krishna and L. S. Tuckerman, J. Fluid Mech. **279**, 49 (1994).
3. D. S. Goldobin, A. V. Pimenova, K. V. Kovalevskaya, D. V. Lyubimov, and T. P. Lyubimova, Phys. Rev. E **91**, 053010 (2015).
4. V. Sorokin, Sov. Phys. Acoust **3**(3), 281 (1957).
5. B. Avvaru, M. N. Patil, P. R. Gogate, and A. B. Pandit, Ultrasonics **44**(2), 146 (2006).
6. J. Xu and D. Attinger, Phys. Fluids **19**(10), 108107 (2007).
7. V. Preobrazhensky, V. Aleshin, and P. Pernod, Phys. Wave Phenomena **26**(3), 234 (2018).
8. N. Francois, H. Xia, H. Punzmann, and M. Shats, Phys. Rev. Lett. **110**, 194501 (2013).
9. С. В. Филатов, Д. А. Храмов, А. А. Левченко, Письма в ЖЭТФ **106**(5), 305 (2017).
10. С. В. Филатов, С. А. Алиев, А. А. Левченко, Д. А. Храмов, Письма в ЖЭТФ **104**(10), 714 (2016).
11. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теоретическая физика. Гидродинамика*, Наука, М. (1986), с. 345.
12. О. А. Сапожников, М. А. Смагин, Акустический журнал **61**(2), 199 (2015).