

СПИРАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ ИЗ ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ СТОЯЧИХ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН

С. В. Кияшко, В. О. Афенченко, А. В. Назаровский

В работе представлены экспериментальные исследования по образованию спиральных структур из тяжелых частиц под действием поля параметрически возбуждаемых стоячих спиральных волн. Частицы двигаются под действием поля средних течений, возникающих вблизи дна в вязкой жидкости под действием стоячих волн. Эффект образования структур имеет пороговый характер и зависит от интенсивности поля стоячих волн. Обнаружено образование многозаходных спиральных структур.

Ключевые слова: Формообразование, капиллярные волны, транспорт частиц, топологические дефекты.

Введение

При исследованиях в океанологии, биофизике, астрофизике, а также при решении прикладных проблем, связанных с разработкой технологии, часто возникают задачи о движении частиц в поле гидродинамических течений [1]. Существенный интерес представляет выяснение механизма транспорта тяжелых частиц в гидродинамических системах, когда они находятся вдали от состояния равновесия. В результате процессов самоорганизации в таких системах могут возникать пространственные структуры, и движение частиц может дать дополнительную информацию о самих структурах. Движение частиц в параметрически возбуждаемой капиллярной ряби исследовалось в ряде работ [2–5] в условиях возникновения взаимно ортогональных стоячих волн на поверхности слоя вязкой жидкости, колеблющейся в вертикальном направлении. Исследовались траектории отдельных частиц и диффузия облака частиц в такой тетрагональной структуре волн.

При увеличении вязкости в параметрически возбуждаемой ряби на фоне регулярной структуры могут возникать топологические дефекты [6]. Они обладают свойствами квазичастиц, могут взаимодействовать, образовывать цепочки в виде доменных стенок и аннигилировать. С ростом амплитуды колебаний слоя жидкости

число возникающих дефектов увеличивается, а образом пространственного беспорядка при этом является ансамбль взаимодействующих дефектов [7,8].

Известно, что в поле поверхностных стоячих волн плавающие частицы собираются в узлах стоячих волн. При этом частицы расположены на линиях, повторяющих структуру стоячих волн, а тяжелые частицы остаются лежать на дне, так как при малой вязкости сил вязкого трения, возникающих при обтекании частиц, еще не достаточно, чтобы сдвинуть их с места. При увеличении вязкости эти силы возрастают и течение жидкости вблизи дна способно передвигать частицы. Именно такая ситуация рассматривается в данной работе. В жидкости большой вязкости из-за сильной конкуренции выживает только одна пара стоячих волн, и на поверхности жидкости при параметрическом возбуждении образуются роликовые (линейчатые) структуры. Обычно в кюветах прямоугольной формы прямые роликовые структуры расположены параллельно одной из сторон кюветы. В круглой кювете обычно наблюдаются круговые стоячие волны.

В работе [9] исследовалось образование круговых пространственных структур из суспензии биологических клеток. Так как параметрически возбуждаемая рябь при сильной конкуренции представляет собой типичную автоколебательную систему, то в ней может быть мультистабильность. В зависимости от начальных условий при неизменных параметрах среды возможны различные устойчивые состояния, различающиеся пространственной структурой поля. Недавно в работе [10] было показано существование многозаходных спиральных волн, которые различались числом заходов спирали и направлением их закрученности.

В настоящей работе исследуется образование спиральных структур из тяжелых частиц под действием поля параметрически возбуждаемых спиральных волн.

1. Описание эксперимента

Эксперимент проводился следующим образом. В круглую кювету диаметром 150 мм, выполненную из алюминия, помещался слой жидкости толщиной 3.5...4.5 мм. В качестве жидкости использовалось силиконовое масло ПМС-100 с динамической вязкостью $\eta = 0.886$ г/(см·сек), коэффициентом поверхностного натяжения $\sigma = 19.7$ дин/см, плотностью $\rho = 0.963$ г/см³ (при температуре 25°C). Затем на дно кюветы помещался слой частиц меди толщиной 0.15...0.25 мм (размер частиц порядка 50 микрон). Частицы распределялись равномерно по всей плоскости дна. Для этого с помощью кончика мягкой кисточки делались случайным образом круговые движения, а результат контролировался по равномерному окрашиванию дна за счет красного цвета частиц, которые были видны сквозь прозрачный слой силиконового масла. Толщина слоя частиц оценивалась по предварительному взвешиванию массы частиц в заданном объеме, учитывая их насыпную плотность. Эксперимент проводился для различных частот накачки из диапазона 41...91 Гц.

Особое внимание уделялось юстировке кюветы в горизонтальной плоскости, так как при наклоне кюветы глубина становится различной в разных частях кюветы, что приводит к неоднородному распределению воздействия стоячих волн на частицы. Поэтому для юстировки по горизонтали кювета с жидкостью предварительно помещалась на вибростол вибростенда фирмы TIRAVIB, на усилитель кото-

рого подавался управляющий сигнал с кварцевого генератора. Амплитуда ускорения вибростола контролировалась с помощью пьезоакселерометра. Под действием вертикальных осцилляций кюветы на поверхности слоя жидкости возникали роликовые структуры стоячих волн. В случае неоднородной глубины, вблизи порога генерации волны возбуждаются вначале в более глубоком месте, а в более мелком не возбуждаются, таким образом однородная генерация по всей площади кюветы соответствует равномерной глубине слоя жидкости. Поэтому юстировку кюветы проводили вблизи порога возбуждения волн, добиваясь однородности волнового поля. Мерой превышения порога возбуждения волн является надкритичность, определяемая формулой $\varepsilon = A/A_{кр} - 1$ (здесь A , $A_{кр}$ – текущая и пороговая амплитуды внешней силы, соответственно). После юстировки на дно кюветы помещались частицы меди. Подробнее схема установки описана в работах [11,12]. После включения вибростенда при увеличении амплитуды выше некоторой критической величины на поверхности жидкости возбуждалась роликовая структура, содержащая одну пару стоячих волн.

Однако в обычных условиях спиральные волны не возбуждаются, а наблюдаются только круговые волны и изогнутые ролики. Существование параметрически возбуждаемых спиральных волн предсказано не было; многозаходные спиральные волны недавно были обнаружены экспериментально [10]. Спиральная волна возбуждалась с помощью создания дефекта на краю кюветы, который далее начинал притягиваться к центру, что создавало спиральную волну. Так как спиральная волна вращается вокруг своего центра, это мешает образованию неподвижного, относительно дна, спирального рельефа из частиц. Поэтому для замедления скорости вращения спирали борта кюветы были выполнены с наклоном. Далее при фиксированной глубине и толщине слоя частиц проводились серии экспериментов для различных частот накачки и разных значений надкритичности.

Находились условия существования процесса образования спиральных структур в зависимости от надкритичности. Одновременно проводилась запись на видеокамеру процесса во времени для дальнейшей обработки на компьютере.

2. Результаты эксперимента

Эксперименты показали, что образование спиральных структур происходит в широкой области параметров. Выяснилось, что процесс носит пороговый характер по величине надкритичности и если надкритичность меньше некоторой пороговой величины, то частицы неподвижны, хотя стоячие спиральные волны уже существуют. Установлено, что основными параметрами, которые влияют на качественно различное поведение системы, являются надкритичность ε и частота вынуждающей силы F . На рис. 1 представлены экспе-

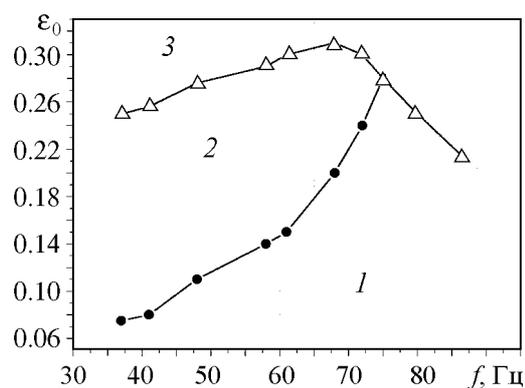


Рис. 1. Экспериментально найденные области параметров с различным поведением системы

риментально найденные области параметров на плоскости (ε, F) с различным поведением системы. В области 1 устойчиво существуют стоячие спиральные волны на поверхности жидкости, но частицы покоятся на дне кюветы. Очевидно, что скорости средних течений недостаточно велики, чтобы сдвинуть частицы (скорости средних течений пропорциональны квадрату амплитуды поля стоячих волн). В области 2 уже возникают и формируются спиральные структуры из частиц. При этом на дне возникает периодический рельеф из частиц с распределением частиц по радиусу, близким к синусоидальной функции. Линия, разделяющая области 1 и 2, задает критическую величину надкритичности, при превышении которой начинается эффект образования структур на дне. В области 3 спиральные стоячие волны становятся неустойчивыми. Возникают хаотические волны модуляции и дефекты, поэтому процесс образования регулярных структур из частиц нарушается. Типичные картины образовавшихся на дне спиральных структур представлены на рис. 2, 3. На рис. 2 представлена двухзаходная спиральная структура, установившаяся под действием стоячего поля однозаходной спиральной стоячей волны. Заметим, что число заходов удваивается по сравнению с однозаходной спиральной поверхностной волной и совпадает с усредненной картиной стоячего поля. Соответственно на рис. 3 представлена четырехзаходная спиральная структура, полученная под воздействием двухзаходной спиральной стоячей волны. Для исследования процесса формирования структур из частиц во времени мы получили записи роста структур в виде последовательности кадров, однако непосредственное измерение роста амплитуды слоя частиц было затруднительно. Для качественной оценки толщины слоя частиц использовалась покадровая обработка яркостной картины периодического распределения частиц в пространстве с учетом нормирования яркости на единицу. Интенсивность яркости после нормировки менялась от 0 (белый цвет, отсутствие частиц) до 1 (черный цвет, максимальная плотность частиц). На рис. 4 представлена типичная картина распределения интенсивности яркости частиц в структуре в радиальном сечении в начальный и конечный момент времени. Видно, что из начального

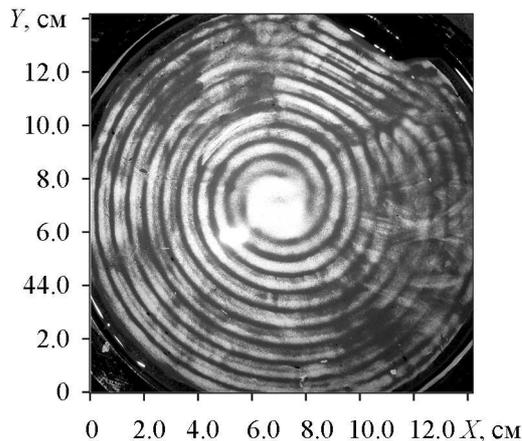


Рис. 2. Двухзаходная спиральная структура примеси, образованная спиральной волной при частоте $f = 68$, глубине $h = 3.6$, амплитуде ускорения $4g$

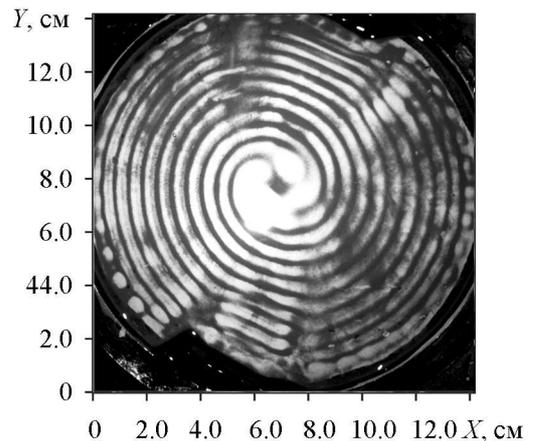


Рис. 3. Четырехзаходная спиральная структура примеси, образованная двухзаходной спиральной волной при частоте $f = 68$, глубине $h = 3.6$, амплитуде ускорения $4g$

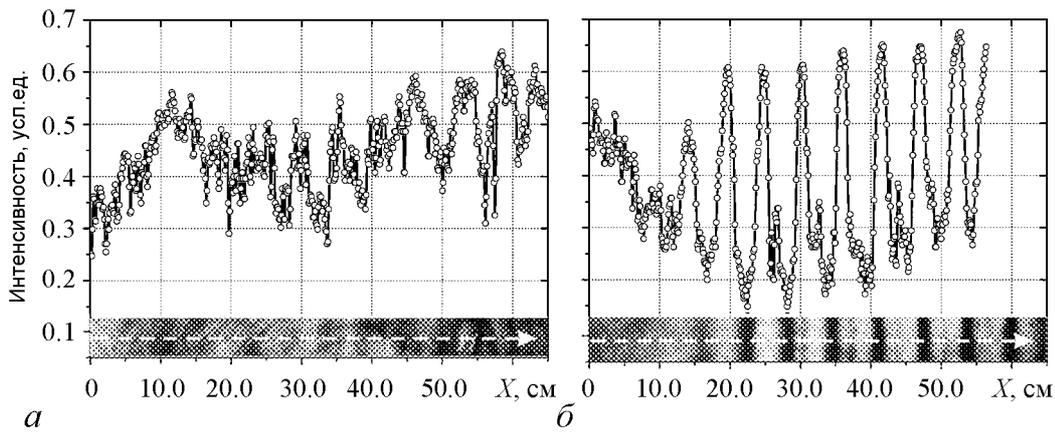


Рис. 4. Картина распределения интенсивности яркости частиц в структуре в радиальном сечении (реальные фото обрабатываемых секторов показаны под графиками) под действием спиральной волны в начальный (а) и конечный (б) момент времени (через 21 с)

случайного распределения (рис. 4, а) под действием стоячих волн частицы формируют в пространстве структуру, близкую к периодической (рис. 4, б), при этом период структуры вдвое меньше длины волны. На рис. 5 представлен график зависимости нормированной на единицу амплитуды квазипериодической функции распределения частиц в пространстве от времени, полученный вычислением усредненной разницы между максимумами и минимумами в яркостной картине структуры частиц.

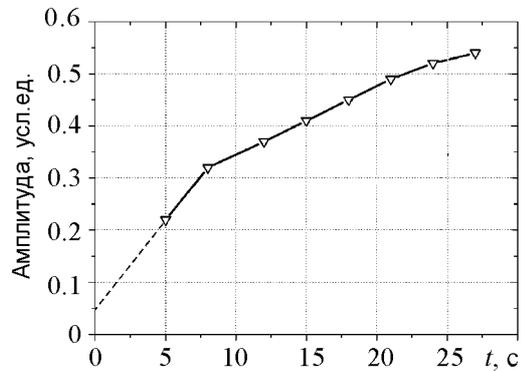


Рис. 5. Зависимость амплитуды периодической функции распределения частиц в пространстве от времени

3. Обсуждение результатов эксперимента

Оценим параметры переноса тяжелой частицы течением вязкой жидкости. Известно [12], что в вязкой жидкости частицы малого размера тонут со скоростью

$$V = \frac{2}{9} R^2 \frac{\rho_1 - \rho_2 g}{\rho_2 \nu}, \quad (1)$$

где ρ_1 и R – плотность и радиус частицы, ρ_2 и ν – плотность и кинематическая вязкость жидкости, соответственно. Если размер частицы δ порядка 10^{-3} см, вязкость в 10 раз больше вязкости воды, а плотность частицы в 5 раз превышает плотность жидкости, то скорость осаждения частиц будет приблизительно 0.5 см/сек.

Если скорость внешнего потока направлена против силы тяжести и превышает эту величину, то частица будет передвигаться под действием потока жидкости.

Оценим колебательную скорость потока, создаваемую в волне. Вертикальная скорость V_2 порядка $A\omega$; тогда при частоте вибраций экспериментальной установки

$F = 30$ Гц и амплитуде волны 0.5 мм ее величина составит примерно 7.5 см/сек. Если вертикальная компонента скорости V_2 будет превышать 0.5 см/сек, то частица будет отрываться от остальных частиц и перемещаться потоком.

Так как при уменьшении надкритичности амплитуда стоячей волны уменьшается, то эффект образования периодической структуры поля будет иметь пороговый характер, как это и наблюдалось в эксперименте (рис. 2, 3). В цилиндрических координатах $\{r, \varphi\}$ переменную в пространстве часть высоты слоя частиц можно представить в виде: $\tilde{h} = A(r, t) \cdot f(kr, \varphi)$, где A – огибающая амплитуды для известной периодической по r функции $f(kr, \varphi)$, возникающей в процессе неустойчивости, а k – волновое число, описывающее период изменения высоты слоя частиц.

Учитывая то, что у нас в эксперименте наблюдается рост спиральной структуры из частиц в течение $15...20$ с, а затем наступает ограничение, можно предложить модельные уравнения для описания этого процесса. Так как исходная толщина слоя одинакова во всем пространстве пятна, а неустойчивость так же однородна в пространстве, то в уравнении будет только зависимость от времени

$$\frac{dA}{dt} = \gamma - \alpha A^2, \quad (2)$$

где постоянные коэффициенты γ и α находятся из эксперимента. Например, для слоя жидкости толщиной 4 мм, при толщине слоя частиц меньше критической и коэффициентах, равных 1 и 3 , соответственно, уравнение (2) качественно хорошо описывает результаты эксперимента.

Таким образом, исходя из результатов эксперимента, выяснилось, что под действием поля параметрически возбуждаемых стоячих спиральных волн в жидкости большой вязкости возможно образование спиральных структур из тяжелых частиц, находящихся на дне кюветы. Процесс образования спиральных структур наблюдается в широкой области параметров. Эффект имеет пороговый характер и зависит от интенсивности поля стоячих волн. Обнаружено образование многозаходных спиральных структур из частиц. Установлено, что основными параметрами, изменение которых вызывает качественно различное поведение системы, являются надкритичность и частота вынуждающей силы. Предложенные модельные уравнения качественно хорошо описывают поведение в системе.

Библиографический список

1. *Ottino J.M.* The kinematics of mixing: Stretching, chaos, and turbulence. Cambridge University press, Cambridge, 1989.
2. *Gollub J.P.* Nonlinear waves: Dynamics and transport // *Physica D*. 1991. Vol. 51. P. 501.
3. *Mesquita O.N., Kane S., Gollub J.P.* Transport by capillary waves: Fluctuating Stokes drift // *Phys. Rev. A*. 1992. Vol. 45, № 6. P. 3700.
4. *Ramshankar R., Berlin D., Gollub J.P.* Transport by capillary waves. Part I. Particle trajectories // *Phys. Fluids A* 2. 1990. P. 1955.
5. *Ramshankar R., Gollub J.P.* Transport by capillary waves. Part II: Scalar dispersion and the structure of the concentration field // *Phys. Fluids A* 3. 1991. P. 1344.
6. *Ezersky A.B., Kiyashko S.V., Matusov P.A., Rabinovich M.I.* Domains, domain walls and dislocations in capillary ripples // *Europhys. Lett.* 1994. Vol. 26, № 3. P. 183.

7. *Ezersky A.B., Kiyashko S.V., Nazarovsky A.V.* Bound states of topological defects in parametrically excited capillary ripples // *Physica D*. 2001. Vol. 152–153. P. 310.
8. *Езерский А.Б., Кияшко С.В., Назаровский А.В.* Перенос примеси топологическими дефектами поля параметрически возбуждаемой капиллярной ряби // Препринт №506 ИПФРАН, 1999.
9. *Takagi S., Krinsky V., Pumir A., Frelin C.* The use of Faraday instability to produce defined topological organization in cultures of mammalian cells // *I. J. Bifurcation and Chaos*. 2002. Vol. 12, № 9. P. 2009.
10. *Kiyashko S.V., Korzinov L.N., Rabinovich M.I., Tsimring L.Sh.* Rotating spirals in a Faraday experiment // *Phys. Rev. E*. 1996. Vol. 54, № 5. P. 5037.
11. *Афенченко В.О., Езерский А.Б., Кияшко С.В., Назаровский А.В.* Новые типы топологических дефектов и возможности управления хаосом дефектов в паттернах поверхностных капиллярных волн // *Нелинейный Мир*. 2008. Т. 6, № 5–6. С. 304.
12. *Afenchenko V.O., Ezersky A.B., Kaverin B.S., Kiyashko S.V., and Chesnokov S.A.* Production of materials with periodically arranged microparticles by photopolymerization of patterns formed at parametric excitation of capillary surface waves // *Physics of Wave Phenomena*. 2011. Vol. 19, № 1. P. 68.

ИПФ РАН, Н. Новгород

Поступила в редакцию 25.01.2013
После доработки 11.03.2013

SPIRAL STRUCTURES FROM HEAVY PARTICLES AT PARAMETRICAL EXCITEMENT OF STANDING CAPILLARY WAVES

S. V. Kiyashko, V. O. Afenchenko, A. V. Nazarovsky

The paper presents experimental studies on the formation of spiral structures of heavy particles by the field of parametrically excited standing spiral waves. Particles move under the influence of the average currents field generated near the bottom in a viscous liquid by standing waves. The formation of structures has a threshold character and depends on the intensity of the field of standing waves. Formation of multi-armed structures revealed.

Keywords: Pattern formation, capillary waves, transport of particles, topological defects.



Кияшко Сергей Васильевич – родился в 1942 г., окончил Горьковский государственный университет (1969). После окончания ГГУ работает в Институте прикладной физики РАН ведущим научным сотрудником. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в НИРФИ (1980) и доктора физико-математических наук по специальности механика жидкости и плазмы (2004). Область научных интересов – теоретическое и экспериментальное исследование динамики волновых процессов в нелинейных средах с неустойчивостью. Опубликовал более 50 статей в отечественных и иностранных журналах.

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: kiyashko@appl.sci-nnov.ru



Афенченко Владимир Олегович – родился в 1973 г., окончил Нижегородский государственный университет (1995) по специальности радиофизика, защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в НГТУ (2002). Научный сотрудник Института прикладной физики РАН. Область научных интересов – волновые процессы, структурообразование в неравновесных средах, динамика вязкой жидкости. Имеет более 30 публикаций в отечественных и иностранных журналах.

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: afen@appl.sci-nnov.ru



Назаровский Александр Владимирович – родился в 1974 г., окончил радиофизический факультет Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (1998), кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Института прикладной физики РАН. Область научных интересов – волновые процессы, хаос и формирование структур в неравновесных средах. Имеет более 30 публикаций в отечественных и иностранных журналах.

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: nazarovskiy@appl.sci-nnov.ru