



## ДИНАМИКА РОЛИКОВЫХ ДОМЕНОВ И ОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУР ИЗ ЧАСТИЦ ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН

*С. В. Кияшко, А. В. Назаровский*

Институт Прикладной физики РАН  
603950, Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46  
E-mail: kiyashko@appl.sci-nnov.ru, nazarovsky@appl.sci-nnov.ru

Представлен обзор результатов изучения динамики роликовых доменов параметрически возбуждаемых волн на поверхности жидкости. С позиции нелинейной динамики обсуждаются процессы установления регулярных волновых структур и структур из тяжелых частиц, образующихся под действием поля стоячих волн.

В экспериментальных исследованиях получен ряд интересных результатов, касающихся динамики роликовых доменов и образование структур из частиц при параметрическом возбуждении капиллярных волн. Обнаружен эффект мультивариантности сценариев перехода к устойчивому состоянию равновесия. Обнаружено, что при включении внешнего сигнала наблюдаются различные сценарии в динамике конкурирующих доменов при неизменных параметрах системы. На поверхности жидкости большой вязкости при многоугольной форме границ обнаружен эффект мультистабильности, при которой возможно существование нескольких устойчивых роликовых режимов, отличающихся только ориентацией в пространстве. Обнаружено образование многозаходных спиральных структур из тяжелых частиц, помещенных в слой жидкости, на поверхности которого параметрически возбуждаются капиллярные волны.

Известно, что процессы возникновения, взаимодействия, синхронизации и разрушения пространственных структур во многих системах имеют схожую динамику. Но в некоторых системах изучение этих процессов может быть сопряжено со значительными трудностями. В данном случае результаты получены при исследовании параметрически возбуждаемой капиллярной ряби, которая является весьма удобным объектом для исследования образования структур и перехода от регулярных структур к хаосу из-за своей простоты и вместе с тем большого разнообразия наблюдаемых эффектов. Описанные в обзоре результаты будут важны для понимания процессов происходящих в системах различной физической природы.

*Ключевые слова:* Формообразование, капиллярные волны, роликовые структуры, конкуренция доменов, тяжелые частицы, спиральные структуры, мультистабильность.

DOI: 10.18500/0869-6632-2016-24-4-17-38

*Ссылка на статью:* Кияшко С.В., Назаровский А.В. Динамика роликовых доменов и образование структур из частиц при параметрическом возбуждении капиллярных волн // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2016. Т. 24, № 4. Р. 17–38.

## Введение

Автоколебательные процессы в активных двумерных системах часто приводят к мультистабильности, когда при фиксированных параметрах системы в зависимости от начальных условий возможно установление различных стационарных состояний. Фазовое пространство подобных систем может быть достаточно сложным и содержать не только простые аттракторы, но и хаотические. Возникновение новых состояний равновесия, как правило, связано с нахождением системы вблизи точек бифуркации. Для построения моделей, описывающих процессы, происходящие в двумерных системах с неустойчивостью, используются уравнения типа Гинзбурга–Ландау и Свифта–Хохенберга [1]. При этом возможность существования нескольких устойчивых состояний равновесия обосновывается наличием существования нескольких локальных минимумов функционала свободной энергии. Для понимания процессов, происходящих в реальных физических системах важно знать, каким образом происходит процесс установления какого-либо устойчивого состояния. Во многих мультистабильных автоколебательных системах имеется резонатор. Устойчивые состояния равновесия соответствуют одной из мод резонатора (они могут отличаться частотой и пространственной структурой). Достижение равновесного состояния происходит за один этап в процессе роста начальных возмущений и установления стационарной амплитуды за счет нелинейных потерь при конкуренции с другими модами. При этом отбор одной из возможных мод происходит на стадии линейного роста возмущений. Побеждает та мода, для которой начальные возмущения лежат в области притяжения ее равновесного состояния [1].

При наличии сильного затухания в автоколебательных системах границы не создают резонатора и оказывают слабое ориентирующее влияние на волновое поле. Это обстоятельство качественно меняет процесс достижения устойчивого состояния равновесия в системе. Теперь в процессе неустойчивости и достижения амплитудой поля стационарного значения еще не происходит достижения устойчивого состояния равновесия, так как влияние границ слабое. Затем, на втором этапе будет происходить длительный процесс взаимодействия с границами, в конце которого поле будет полностью согласовано с границами и состояние равновесия будет полностью достигнуто. Такая ситуация возникает например при параметрическом возбуждении волн в среде с сильным затуханием. Однако, насколько нам известно из публикаций, исследование достижения состояния равновесия в двумерных параметрически возбуждаемых системах при наличии мультистабильности в условиях сильной конкуренции еще не проводилось. Что, по-видимому, связано с трудностями проведения измерений на высоких частотах электромагнитных волн.

В то же время параметрически возбуждаемая капиллярная рябь является одним из наиболее удобных объектов для экспериментального исследования формообразования структур и перехода от регулярных структур к хаосу. Это связано с удобством изменения контрольных параметров в системе: надкритичности, диссипации, длины возникающих волн, граничных и начальных условий, а также легкостью визуализации возникающих полей поверхностных волн. Исследовались нестационарные пространственно неоднородные режимы [2], модуляционная неустойчивость [3], возникновение доменов, доменных стенок [4] и переход к хаосу дефектов [5]. При увеличении вязкости нелинейные потери увеличиваются, и при большой вязкости воз-

никает сильная конкуренция, а на поверхности жидкости может существовать только одна пара стоячих волн. В этом случае наблюдаются роликовые структуры с различной ориентацией. В процессе установления стационарного режима могут возникать домены поля, отличающиеся пространственной ориентацией, которые конкурируют друг с другом [6, 7]. Эксперименты с роликовыми структурами, как правило, проводились в кюветах прямоугольной и круглой геометрии. При этом обычно наблюдались круглые решения в круглой кювете и прямые ролики, параллельные одной из сторон, в прямоугольной кювете. Домены поля с различной ориентацией роликов в пространстве могут конкурировать друг с другом. Подобная ситуация для 2-х взаимодействующих доменов рассмотрена в работе [6]. Движение фронта, разделяющего домены, происходило равномерно и параллельно одной из границ прямоугольной кюветы, и задача по существу была одномерной. В работе [7] экспериментально исследована динамика двумерных роликовых доменов сложной формы, у которых подвижными границами являются несколько сторон. Показано, что в зависимости от начальных и граничных условий на краях кюветы возникают двумерные домены различной формы, а их динамика определяется движением их фронтов. Форма кюветы при этом была квадратной. В настоящей работе исследуется динамика роликовых доменов в кювете прямоугольной формы и в кювете с закругленным углом, где качественное поведение в системе теперь будет зависеть и от соотношения длин ее сторон [8, 9]. Границы многоугольных доменов при этом состоят из отрезков прямолинейных фронтов, которые расположены под различными углами друг к другу. При этом ролики в различных доменах были ориентированы перпендикулярно друг к другу и параллельно разным границам кюветы.

Так как при сильной диссипации кюветы не являются резонаторами для волн, а границы кюветы оказывают слабое ориентирующее воздействие на волны, то кроме простых роликовых структур могут возникать и более сложные структуры, такие как, например, спиральные волны и прямые ролики в круглой кювете [10, 11]. При этом при возбуждении капиллярных волн ориентация роликов в круглой кювете могла быть различной в пространстве (безразличное состояние равновесия). Можно предположить, что, если граница содержит несколько прямых участков, то границы кюветы окажут свое ориентирующее воздействие и могут возникнуть многоустойчивые состояния равновесия для прямых роликовых структур, различающихся по углу ориентации роликов относительно выбранного направления от центра кюветы к ее границе.

В настоящей работе исследуется возникновение многоустойчивых состояний равновесия для роликовых структур и их устойчивость при отклонении роликов по углу от состояния равновесия в кюветах многоугольной формы [12].

При исследовании процессов, происходящих в океанологии, биофизике, астрофизике, а также при решении прикладных проблем, связанных с разработкой технологии часто возникают задачи о движении частиц в поле гидродинамических течений [13]. Существенный интерес представляет выяснение механизма транспорта тяжелых частиц в гидродинамических системах, когда они находятся вдали от состояния равновесия. В таких системах при этом в результате процессов самоорганизации могут возникать пространственные структуры, и движение частиц могут дать дополнительную информацию о самих структурах. Движение частиц в параметрически возбуждаемой капиллярной ряби исследовалось в ряде работ [14–17] 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 квадратной решетке волн.

При увеличении вязкости в параметрически возбуждаемой ряби на фоне регулярной структуры могут возникать топологические дефекты. Они обладают свойствами квазичастиц, могут взаимодействовать, образовывать цепочки в виде доменных стенок и аннигилировать.

С ростом амплитуды колебаний слоя число возникающих дефектов увеличивается и образом пространственного беспорядка при этом является ансамбль взаимодействующих дефектов [5, 18].

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 недостаточно, чтобы сдвинуть их с места.

При увеличении вязкости эти силы возрастают, и течение жидкости вблизи дна становится способно передвигать частицы. Именно такая ситуация рассматривается в данной работе [19]. 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 ролики расположены параллельно одной из сторон кюветы. В круглой кювете обычно наблюдаются круговые стоячие волны.

В работе [20] 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, отличающиеся пространственной структурой поля. Недавно в работе [10] было показано существование многозаходных спиральных волн, которые отличались числом заходов спирали и направлением их закрученности.

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

### Описание эксперимента

Эксперименты по исследованию динамики роликовых доменов при сильной конкуренции проводились подобно тому, как это было в работе [7]. В качестве экспериментальной жидкости использовалось силиконовое масло большой вязкости с такими параметрами: вязкость жидкости  $\nu = 0.95 \text{ см}^2/\text{с}$ , плотность  $\rho = 0.97 \text{ г/см}^3$  и коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma = 20 \text{ дин/см}$ . Использовались прямоугольные кюветы, выполненные из оргстекла с размерами 23 см по длинной стороне и от 11 до 23 см по короткой. Вертикальные колебания кюветы создавались с помощью вибростенда TV2500 фирмы «TIRAvib», а колебания вибростенда управлялись синусоидальным сигналом от кварцевого генератора. В экспериментах в качестве экспериментальной жидкости использовалось силиконовое масло с большой вязко-

стью (вязкость примерно в 100 раз больше вязкости воды). Кюветы помещались на стол вибростенда и совершали вертикальные вибрации под действием вибростенда. При этом контролировалась амплитуда ускорений и частота вынуждающей силы ( $F \sim 41...81$  Гц) и глубина жидкости ( $L \sim 3.5...5.5$  мм). Картины стоячих волн наблюдались в отраженном свете. Различные сценарии перехода к стационарному состоянию записывались на видеокамеры для компьютерной обработки.

В качестве источника света использовалась лампа дневного света, расположенная на высоте 2 м над поверхностью жидкости. Заметим, что в процессе записи паттернов видеокамерой происходит усреднение изображения по периоду капиллярных волн, так что их пучностям соответствуют более яркие области, чем узлам. Обработка изображения проводилась так же, как в [20].

### Мультивариантность сценариев перехода к устойчивому состоянию при конкуренции роликовых доменов

Синусоидальный управляющий сигнал подавался на усилитель вибростенда при фиксированной глубине жидкости и частоте внешнего сигнала. В момент включения вибростенда на стенках прямоугольной кюветы возникал тонкий пограничный слой, который служил начальным возмущением. Вблизи границ возникают области капиллярных стоячих волн, у которых границы параллельны стенкам кюветы. Фронты этих областей начинают двигаться к центру кюветы со скоростью  $V_{\text{фр}}$ .

Измеряя положение этих фронтов капиллярных волн во времени, можно было определить эту скорость. Выяснилось, что скорость постоянна во времени и при увеличении надкритичности стремится к групповой скорости свободных волн  $V_{\text{гр}}$ . Этот результат хорошо совпадает с результатами в работе [21], где экспериментально исследовалось распространение кругового фронта для жидкости малой вязкости ( $\nu = 0.04$  см<sup>2</sup>/с) и аналогичным результатам по динамике доменов в кюветах квадратной формы [7]. В процессе конкуренции доменов могла возникнуть ситуация, когда в кювете остаются только два домена прямоугольной формы [6]. При этом скорость движения фронтов конкурирующих доменов  $V_{\text{фр}}$  также растет с ростом надкритичности, но величина ее примерно на порядок медленнее, чем скорость фронта возбуждения, который распространяется по области, где ряби еще нет  $V_{\text{фр}} \sim V_{\text{фр}}^0/8$ .

На рис. 1, а представлена двумерная структура поля после того, как фронты возбуждения дошли до центра кюветы, а их амплитуды выровнялись. Видно, что два из трех доменов треугольные, а третий по форме напоминает две трапеции, смещенные меньшими сторонами. При изменении размеров прямоугольной кюветы площади треугольных доменов уменьшались и были равны  $S_{1,2} = a^2/4$ , а площадь большого (трапециидального) домена была равна  $S_0 = ba - a^2$ , где  $a$  и  $b$  – длины короткой и длинной сторон кюветы. В углах прямоугольной кюветы видны зародыши вертикальных и горизонтальных доменных стенок. Экспериментально выяснилось, что диагональные доменные стенки устойчивы в середине кюветы и неустойчивы на краях.

Для нахождения основных сценариев, которые возникают при конкуренции доменов сложной формы в прямоугольных кюветах, мы проводили серии экспериментов с фиксированными параметрами (глубина жидкости, частота и амплитуда

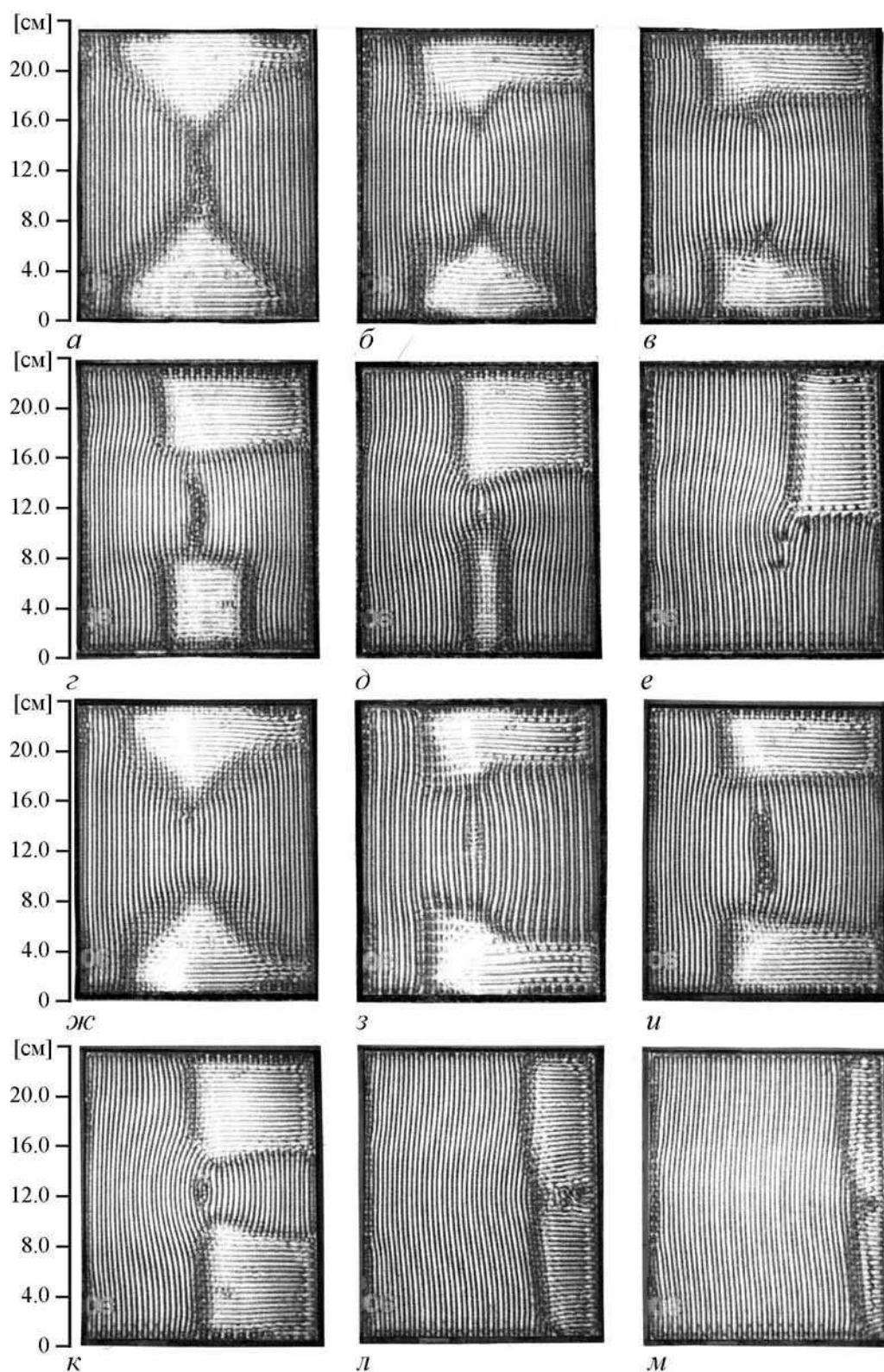


Рис. 1. Последовательная эволюция доменов в кювете 23×18 см

внешнего сигнала). В каждой серии эксперимент повторялся многократно. Для выяснения зависимости этих процессов от соотношения длин сторон кюветы.

Для выяснения зависимости этих процессов от соотношения длин сторон кюветы все эти серии экспериментов проводили отдельно для различных соотношений длин сторон прямоугольной кюветы.

В результате экспериментов обнаружен эффект мультивариантности сценариев перехода к устойчивому состоянию равновесия. Его особенность состоит в том, что при включении внешнего сигнала наблюдаются различные сценарии в динамике конкурирующих доменов при неизменных параметрах системы. Выяснилось, что появление того или иного сценария практически равновероятно и зависит от случайных начальных возмущений. Домены при этом различались как формой их границ, так и характером изменения их площадей во времени. Два характерных сценария динамики доменов сложной формы в процессе конкуренции представлены на рис. 1. Сценарии представлены в виде последовательных картин поля капиллярных волн на поверхности жидкости в кювете прямоугольной формы ( $f = 73$  Гц,  $h = 6$  мм). Каждая последовательность картин поля представлена в виде 6 кадров, расположенных в двух строках (1 и 2 строка представляет один сценарий, а 3 и 4 строки – другой).

На рис. 1 в первой и третьей строке слева изображена картина, с которой начинаются оба сценария. Выяснено, что все сценарии начинаются с одинаковой картины поля. Эта картина устанавливается после того, как фронты ряби после включения достигают середины кюветы, и устанавливается двумерная роликовая структура.

Подобная картина изображена первой слева в верхнем ряду. На этой картине три домена, два из которых представляют собой прямоугольные треугольники. Гипотенузы этих треугольных доменов лежат на коротких сторонах прямоугольной кюветы, а катеты совпадают с диагоналями в углах кюветы и служат границами раздела между доменами. Третий домен с наибольшей площадью по форме напоминает фигуру с двумя трапециями, совмещенными верхними сторонами, а их основания лежат на боковых длинных сторонах кюветы. Сравнивая картины поля в различных сценариях, можно видеть, что в углах кюветы начинают возникать фронты, расположенные перпендикулярно стенке и параллельно роликам другого домена. Далее эти фронты двигаются равномерно, при этом один край скользит вдоль границы раздела исходных треугольных доменов, а другой лежит на границе кюветы.

Такое движение фронтов, разделяющих домены с различной ориентацией роликов, приводит к тому, что треугольные домены плавно трансформируются в квадратные, а затем в прямоугольные (вторая строка) или сжимаются в линию. Так как каждый квадратный домен имеет две границы с перпендикулярным расположением роликов, а границы движутся параллельно роликам в одном домене и перпендикулярно роликам другого домена, то домен квадратной формы будет неустойчивым. Конкуренция на границе двух роликовых доменов исследована ранее в работе [6].

На границе доменов фронты продолжают двигаться равномерно со скоростью  $V_{\text{фр}}$  вдоль каждой из сторон кюветы. В результате квадратные домены далее превращаются в прямоугольные, а площади непрерывно уменьшаются до нуля и устанавливается однородная роликовая структура. Заметим, что при различных сценариях квадратные домены могут возникнуть в различных углах кюветы и однородная роликовая структура может иметь ориентацию вдоль одной из сторон кюветы. Также мы измеряли зависимость площадей конкурирующих доменов от времени после того,

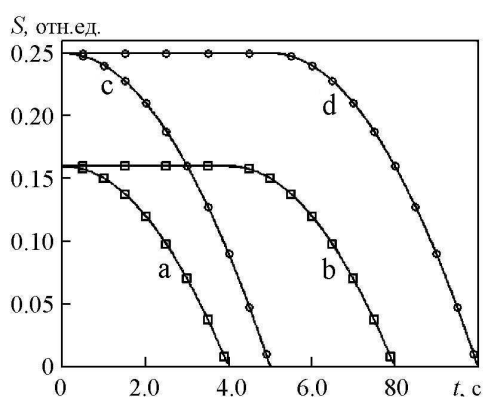


Рис. 2. Графики зависимости площадей доменов от времени в безразмерных единицах: а, с – нижний треугольный домен; b, d – верхний треугольный домен (соответствуют 1-му сценарию динамики доменов на рис. 1, а–е)

короткой стороны). Нижний домен к этому моменту времени непрерывно уменьшается (1-й сценарий на рис. 1, а–е).

На рис. 1 (третья и четвертая строки) представлен другой сценарий, отличающийся тем, что после доменов треугольной формы возникают два симметричных квадратных домена, переходящих в уменьшающиеся прямоугольные домены. В результате измерений найдено 16 различных сценариев при конкуренции доменов, причем 7 основных, а остальные отличаются от них зеркальной или осевой симметрией. С ростом надкритичности  $\epsilon$  увеличивается общая скорость движения фронтов, так как при этом возрастает скорость движения фронтов конкурирующих доменов, а сценарии в динамике фронтов не изменяются. При изменении соотношения длин сторон кюветы сценарии качественно повторяются, а изменяются лишь относительные площади треугольных доменов (рис. 2).

При равенстве длин сторон кюветы (квадратная кювета) в сценариях динамики доменов наступает вырождение и часть сценариев не реализуется, и почти всегда существуют не три, а четыре домена.

На основе экспериментальных данных о динамике доменов сложной формы можно сделать вывод, что основные свойства в поведении доменов состоят в следующем.

1. Процесс динамики доменов начинается с возникновением трех доменов, два из которых треугольные и их основания совпадают с короткими границами кюветы.
2. Границы роликовых доменов, расположенные по диагоналям углов, неустойчивы к возникновению фронтов доменов, параллельных к роликам в одном домене и перпендикулярно роликам в другом домене.
3. Возникающие фронты двигаются с постоянной скоростью, причем один край фронта скользит вдоль границы кюветы, а другой – вдоль диагональной границы, при этом уменьшая ее длину.

Учитывая эти экспериментальные данные, можно построить теоретическую модель, которая может позволить описать динамику двумерных доменов сложной формы, начиная с момента образования доменов треугольной формы. Предположим,

как сформировались домены треугольной формы. На рис. 2 представлены данные измерений зависимости площадей доменов от времени. Экспериментальные данные отмечены точками, сплошные линии соответствуют расчету по теоретической модели, предложенной ниже. Круглые точки соответствуют размеру кюветы  $(1 \times 0.8)$ , а квадратные  $(1 \times 0.5)$  (длина большей стороны принята за единицу). На графике видно, что до момента образования домена квадратной формы верхний домен сложной формы имеет площадь неизменной и равной площади треугольного домена (приблизительно  $0.25a^2$ , где  $a$  – длина



что на поверхности вязкой жидкости, помещенной в квадратную кювету, происходит процесс возбуждения стоячих капиллярных волн. Пусть после включения внешнего управляющего сигнала на поверхности жидкости установилась роликовая структура в виде трех роликовых доменов с однородной в пространстве амплитудой. Из известных экспериментов с жидкостью большой вязкости (вязкость в 100 раз больше, чем вязкость воды) выяснено, что влияние твердых границ приводит к тому, что ролики вблизи границ стремятся принять положение параллельно или перпендикулярно ее границе [10]. Так как диагональная граница симметрична по отношению к близлежащим роликовым доменам, то поэтому она остается устойчивой в середине кюветы. Диагональная граница вблизи стенок кюветы оказывается неустойчивой по отношению к возникновению фронта, параллельного роликам в одном из доменов, а при такой ориентации роликов фронт будет двигаться с максимальной скоростью.

Предположим, что с точностью по времени, равной нескольким периодам внешней силы во всех углах кюветы возникли фронты, параллельные роликам в одном из доменов. Далее возникшие фронты будут двигаться равномерно, при этом один край фронта будет скользить вдоль диагональной границы, а другой – вдоль границы кюветы. Именно такое движение фронтов полностью определяет динамику возникших двумерных доменов сложной формы.

Два возможных сценария в динамике доменов сложной формы, построенные в рамках сделанных исходных предположений, показаны на рис. 3, *a–e* (1-й сценарий), *ж–м* (2-й сценарий), последовательные картины представлены через одинаковые интервалы времени.

Рассмотрим в качестве примера один из возможных сценариев в процессе динамики доменов сложной формы. Пусть у нас возникли четыре новых коротких фронта (рис. 3, *ж*): два вертикальных на нижнем треугольном домене и один вертикальный, а другой горизонтальный на верхнем треугольном домене. Тогда с течением времени верхний домен будет изменять свою форму так, что он будет превращаться в квадратный, оставаясь неизменным по площади (рис. 3, *з–и*). Затем он будет превращаться в домен прямоугольной формы, а площадь его будет непрерывно уменьшаться до нуля (рис. 3, *к–м*). Площадь нижнего домена будет непрерывно уменьшаться до нуля по квадратичному закону. Зависимость площадей доменов от времени легко вычисляется по простым формулам

$$S_1 = 0.25a^2 - V_\phi^2 t^2, \quad \text{для } t \in [0, t_1]$$

$$S_2 = \begin{cases} 0.25a^2, & \text{для } t \in [0, t_1] \\ 0.25a^2 - V_\phi^2 t^2, & \text{для } t \in [t_1, 2t_1] \end{cases} \quad (1)$$

( $t$  – текущее время,  $a$  – длина короткой стороны кюветы,  $t_1 = 0.5a/V_\phi$ ). На рис. 2 представлены графики зависимости площади доменов от времени в безразмерных единицах. Расчет по формулам представлен сплошными линиями, а точки соответствуют экспериментальным данным для двух величин соотношения длин сторон прямоугольной кюветы при величине надкритичности  $\varepsilon = 0.043$ , глубине жидкости  $h$  в мм и частоте внешней силы 73 Гц. В обоих случаях скорость фронта бралась из данных эксперимента.

На рис. 2 видно, что найденная в эксперименте зависимость площади доменов от времени с точностью до ошибки измерения близка к квадратичной и хорошо согласуется с вычисленной в рамках предложенной модели.

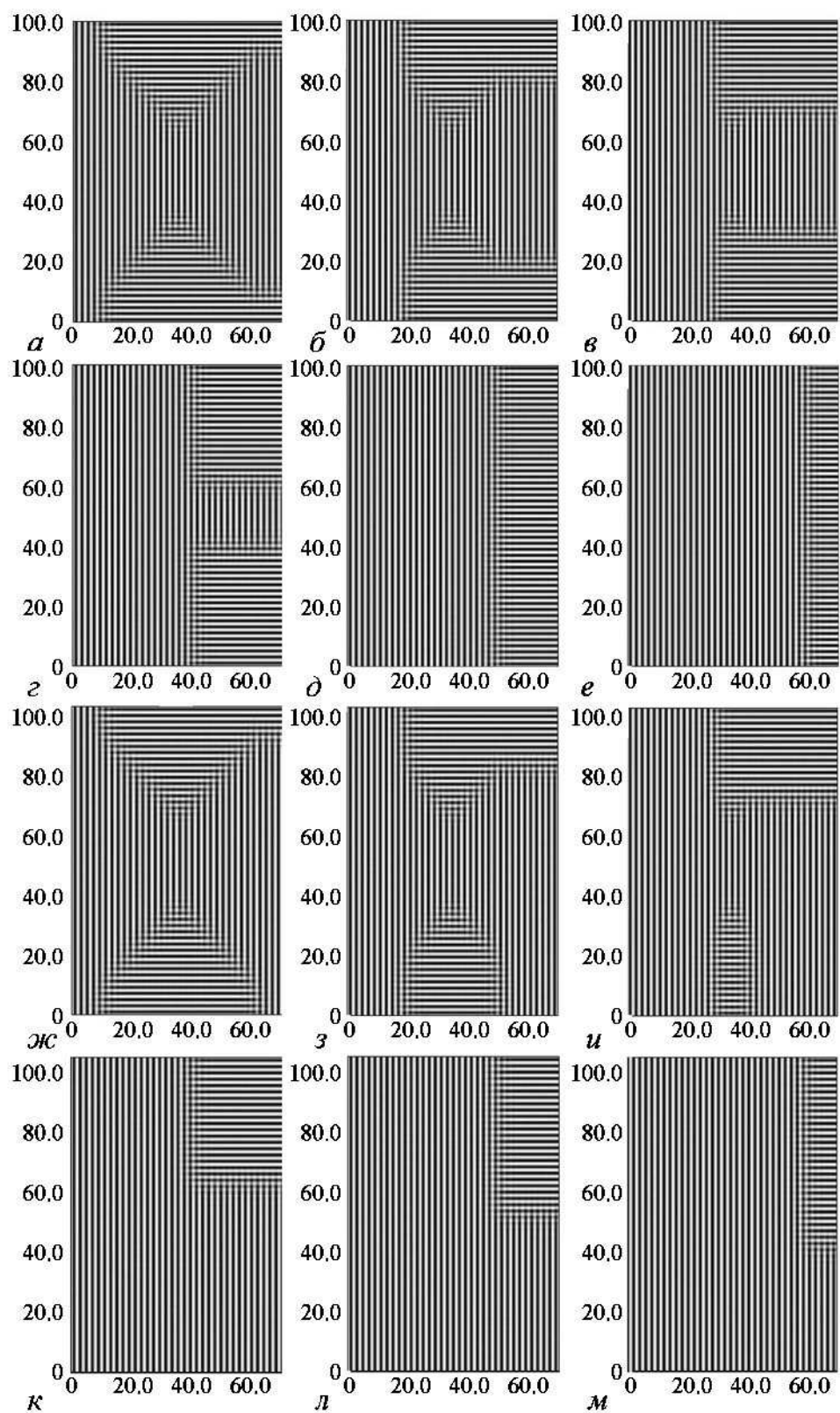


Рис. 3. Последовательные картины поля, полученные при компьютерном моделировании динамики доменов для двух (*a-e*, *ж-м*) из 16-ти возможных сценариев

Мы исследовали также влияние непрямолинейности границ на примере квадратной кюветы с закругленным углом [9]. Выяснилось, что качественное поведение конкурирующих доменов в различных сценариях совпадает с их поведением в кюветах квадратной и прямоугольной формы. Выяснилось, что несмотря на закругление фронты конкурирующих доменов остаются почти прямолинейными, даже и в стационарном состоянии.

### Мультистабильность роликовых структур при многоугольной форме границ

Эксперименты по исследованию мультистабильности для роликовых структур при многоугольной форме границ проводились следующим образом. Начальными условиями служили случайные начальные возмущения, которые возникали при медленном увеличении амплитуды управляющего внешнего сигнала, который подавался на усилитель вибростенда. При амплитуде внешнего сигнала  $A$  больше некоторой критической, на поверхности жидкости возбуждались двумерные структуры стоячих волн в виде прямых роликов. При этом увеличивали надкритичность до величин  $\varepsilon = 0.1 \dots 0.15$  и наблюдали установление устойчивого роликового режима (надкритичность определяется как  $\varepsilon = (A - A_0)/A_0$ , где  $A_0$  – амплитуда ускорения кюветы, при которой возникают капиллярные волны). В результате эксперимента выяснилось, что процесс установления устойчивого стационарного состояния в отличие от автоколебательных систем с резонатором происходит в два этапа. На первом этапе устанавливается квазиустойчивая роликовая структура с амплитудой близкой к стационарной и ориентацией безразличной по отношению к устойчивым состояниям равновесия. Далее на втором этапе происходит на порядок более медленный процесс самоориентации структур к устойчивому состоянию равновесия за счет взаимодействия со стенкой. Ролики при этом выстраиваются перпендикулярно или параллельно к ближайшей стенке кюветы. После установления устойчивого роликового решения мы измеряли угол отклонения роликов от вертикали на соответствующих видеокдрах изображения роликовой структуры поля. Затем повторяли процедуру выключения и включения многократно. При этом наблюдалось счетное число устойчивых состояний равновесия роликов по углу. Причем в кюветах с нечетным количеством сторон многоугольной кюветы количество устойчивых состояний было равно числу сторон, а для кювет с четным числом сторон оно было в два раза меньше (ввиду зеркальной симметрии при обходе по углу половина устойчивых состояний повторяет друг друга). На рис. 4, *a–d* представлены картины устойчивых состояний стоячих волн в кюветах с разным числом сторон. Видно, что в центре кюветы с нечетным числом сторон (пятиугольник) ролики параллельны одной из сторон кюветы, а концы большинства роликов почти перпендикулярно опираются на две противоположные стороны (рис. 4, *a*). В кюветах с четным числом сторон (рис. 4, *b–d*) ролики в центре кюветы опираются обоими концами на две противоположные стенки кюветы. Далее подробнее представим результаты экспериментов в кювете шестиугольной формы.

Проводились серии экспериментов для многоугольных кювет с различным числом сторон для разных глубин жидкости на различных частотах и при разных надкритичностях. В результате выяснилось, что в широком диапазоне параметров существуют многоустойчивые режимы существования роликовых структур, а их чис-

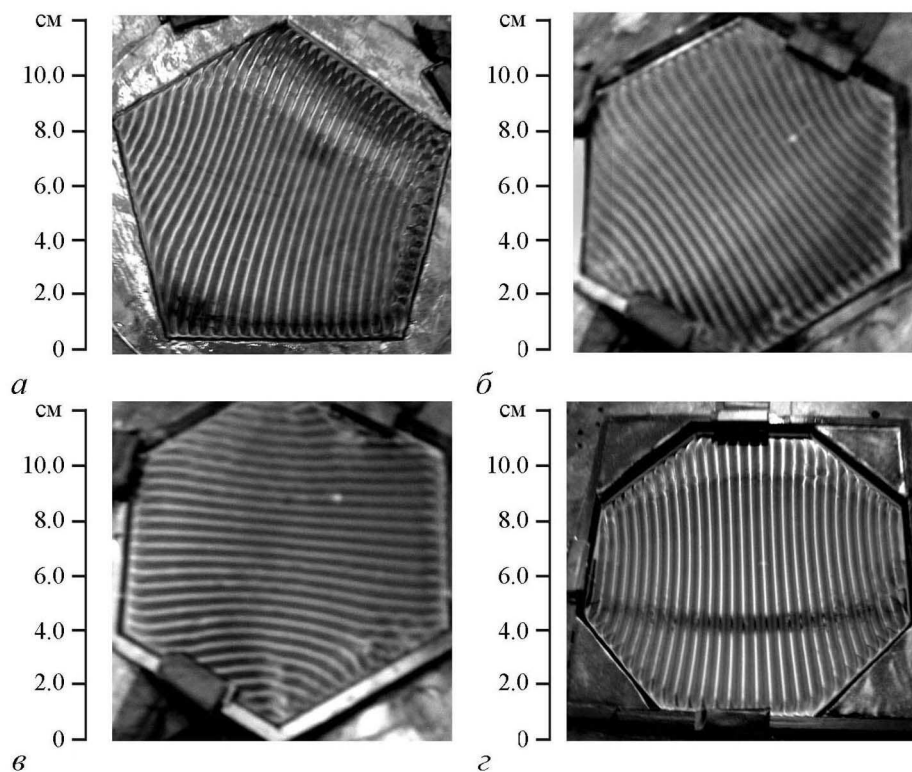


Рис. 4. Двумерные картины устойчивых роликовых режимов в кюветах многоугольной формы. а – пятиугольная кювета, б, в – шестиугольная кювета, з – восьмиугольная кювета. Частота  $F = 53$  Гц, глубина жидкости 6 мм

ло определялось только числом сторон многоугольной кюветы. После обнаружения мультгистабильности мы исследовали устойчивость стационарного режима при отклонении роликовой структуры от состояния равновесия по углу (что соответствует повороту роликовой структуры как целое на некоторый угол вокруг центра кюветы). Для этого выбирали в качестве исходной позиции какую-либо квазиустойчивую роликовую структуру, повернутую на некоторый угол относительно перпендикуляра к какой-либо плоской стороне многоугольной границы. Затем исследовали процесс самоориентации структуры во времени. Выяснилось, что при этом вся роликовая структура вращается как целое вокруг центра кюветы до тех пор, когда длинные ролики, проходящие близко к центру не установятся перпендикулярно плоской границе (в кюветах с нечетным количеством сторон ролики при этом немного изогнутые). Типичный график изменения угла поворота структуры во времени для шестиугольной границы представлен на рис. 5, где устойчивое состояние соответствует  $30^\circ$  по углу, а граница раздела соседних зон устойчивости –  $0^\circ$ ). Видно, что вначале скорость вращения структуры почти постоянна, а затем она уменьшается и стремится к нулю при приближении к состоянию равновесия.

Установлено, что качественное поведение структуры в процессе ее самоориентации не зависит от количества сторон многоугольной границы и от частоты вынуждающей силы. Однако время самоориентации структур зависит от надкритичности. В области устойчивых роликовых режимов мы измерили время самоориентации структуры к состоянию равновесия в зависимости от надкритичности. Измерялось

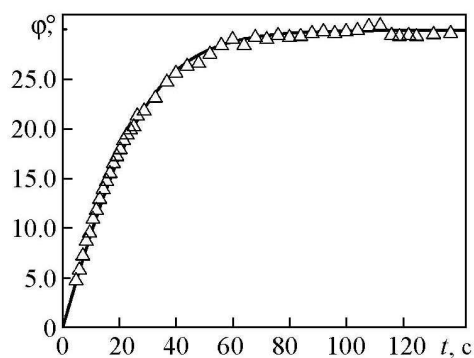


Рис. 5. График изменения угла поворота структуры во времени для шестиугольной кюветы

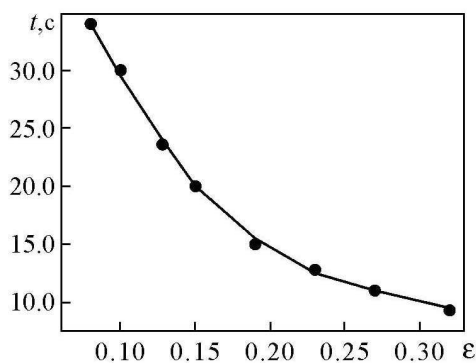


Рис. 6. Зависимость времени установления устойчивого роликового режима от надкритичности. Частота  $F = 53$  Гц, глубина жидкости  $h = 6$  мм

время поворота структуры от начального отклонения по углу от  $2^\circ$  до  $12^\circ$ , так как при дальнейшем повороте при приближении к состоянию равновесия скорость вращения роликовой структуры сильно замедлялась, что видно на рис. 5. На рис. 6 представлены графики такой зависимости для шестиугольной кюветы ( $F = 53$  Гц,  $h \sim 6$  мм). Видно, что время установления устойчивого стационарного режима уменьшается обратно пропорционально надкритичности и при увеличении надкритичности в три раза время самоориентации уменьшилось также в три раза.

Однако при больших значениях надкритичности качественное поведение роликовых режимов может измениться. Если при малых значениях надкритичности для разных частот существуют области устойчивых прямолинейных роликов, то при дальнейшем увеличении надкритичности на фоне роликов из-за неустойчивости однородного режима могут возникать волны модуляции и дефекты, но структуры остаются устойчивыми. Далее при больших значениях  $\epsilon$  наступает хаотический режим, и устойчивые режимы не наблюдаются. Так как поведение системы для кювет с разным числом сторон были подобны, то далее представлены результаты для шестиугольной кюветы. На рис. 7 представлены области существования устойчивых роликов для разных частот в зависимости от надкритичности. В области 1 существуют устойчивые прямые ролики, в области 2 – ролики с дефектами на фоне волн модуляции, а в области 3 – хаотический режим.

Эксперименты показали, что число устойчивых состояний для роликов зависит от количества сторон многоугольной кюветы и растет с увеличением их числа. Стенки многоугольной кюветы оказывают на прилегающие к ним волны ориентирующее воздействие, так же как и в прямоугольных кюветах. Естественно предположить, что минимальная длина стороны при этом должна быть больше, чем длина возбуждающихся волн. Тогда максимальное число

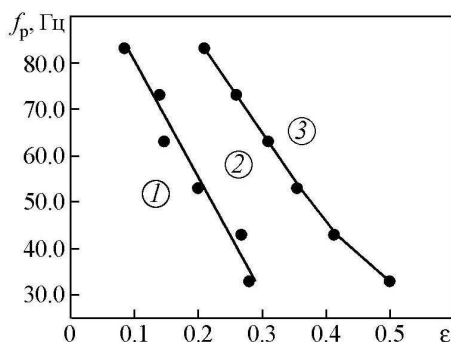


Рис. 7. Области существования устойчивых роликов для разных частот в зависимости от надкритичности

устойчивых состояний в кювете в форме правильного многоугольника с нечетным числом сторон будет:

$$n < \frac{\pi d}{\lambda}, \quad (2)$$

где  $n$  – число устойчивых состояний,  $d$  – поперечный размер кюветы,  $\lambda$  – длина волны возникающих волн (для кюветы с четным числом сторон  $n$  будет в два раза меньше).

Обсудим возможный механизм самоориентации роликов при отклонении от состояния равновесия для многоугольника с четным числом сторон. В устойчивом состоянии равновесия ролики стоячего поля ориентированы перпендикулярно стороне кюветы. В среде с большой вязкостью вблизи стенки под действием поля стоячих волн возникают симметричные вихревые течения, а среднее течение отсутствует. При отклонении от состояния равновесия вихревые течения располагаются под углом к границе, и возникает среднее течение, направленное к состоянию равновесия. В результате под влиянием среднего течения роликовая структура начинает дрейфовать к состоянию равновесия. С помощью частиц расположенных на дне кюветы мы зафиксировали средние течения вблизи стенок. Их величина была близка к скоростям движения концов роликов, скользящих вдоль стенок кюветы. Исходя из экспериментальной зависимости изменения угла поворота роликовой структуры от времени при ее самоориентации можно предложить феноменологическое уравнение типа Гинзбурга–Ландау для описания этого процесса:

$$\frac{d\phi}{dt} = a - b\phi^2, \quad (3)$$

где  $a$  – величина пропорциональная надкритичности,  $b$  – коэффициент нелинейности. На рис. 5 представлен график численного решения зависимости угла поворота структуры от времени для параметров, найденных из эксперимента. Видно хорошее качественное совпадение расчетной зависимости с экспериментальной (рис. 5).

### Образование спиральных структур из тяжелых частиц

Эксперименты показали, что процесс образования спиральных структур наблюдается в широкой области параметров. Выяснилось, что процесс носит пороговый характер по величине надкритичности и если величина надкритичности меньше

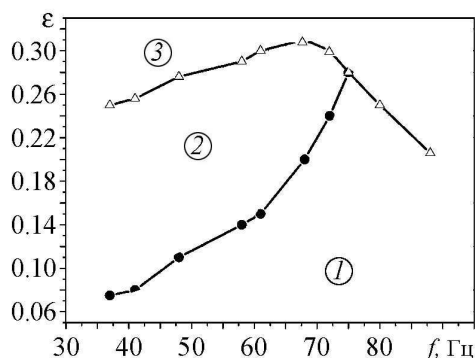


Рис. 8. Экспериментально найденные области параметров с различным поведением системы

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 и частота вынуждающей силы. На рис. 8 представлены экспериментально найденные области параметров с различным поведением системы. В области 1 устойчиво существуют стоячие спиральные волны на поверхности жидкости, но частицы покоятся на дне

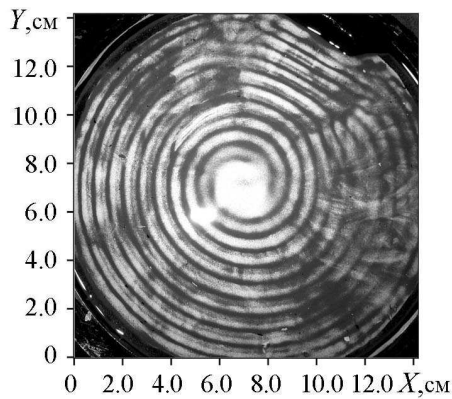


Рис. 9. Двухзаходная спиральная структура примеси, образованная спиральной волной при частоте  $f = 68$  Гц, глубине  $h = 3.6$  мм, амплитуде ускорения  $4g$

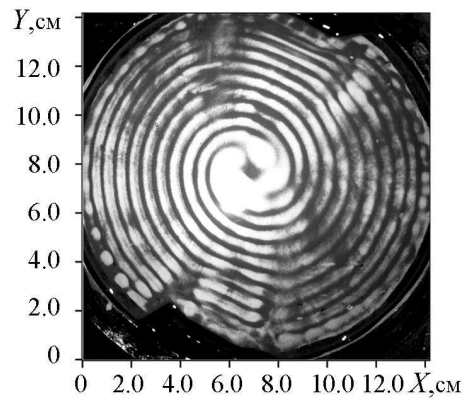


Рис. 10. Четырехзаходная спиральная структура примеси, образованная двухзаходной спиральной волной при частоте  $f = 68$  Гц, глубине  $h = 3.6$  мм, амплитуде ускорения  $4g$

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  $\epsilon$ , при превышении которой начинается эффект образования структур. В области 3 спиральные стоячие волны становятся неустойчивыми. Возникают хаотические волны модуляции и дефекты, и процесс образования регулярных структур из частиц нарушается. Типичные картины образования спиральных структур представлены на рис. 9, 10. На рис. 9 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. На рис. 10 представлена четырехзаходная спиральная структура, полученная под воздействием двухзаходной спиральной стоячей волны. Для исследования формирования частиц во времени мы получили записи роста структур в виде последовательности кадров, однако непосредственное измерение 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 нуля (белый цвет, отсутствие частиц) до единицы (черный цвет, максимальное отсутствие частиц). На рис. 11 представлена типичная картина распределения интенсивности яркости частиц в структуре в радиальном сечении в начальный и в конечный момент времени. Видно, что из начального случайного распределения (рис. 11, а) под действием стоячих волн частицы формируют в пространстве структуру, близкую к периодической (рис. 11, б), при этом период структуры вдвое меньше длины волны периодического распределения частиц в пространстве с учетом нормирования яркости по начальным кадрам. На рис. 12 представлен график зависимости нормированной на единицу амплитуды квазипериодической функции распределения частиц в пространстве от времени,

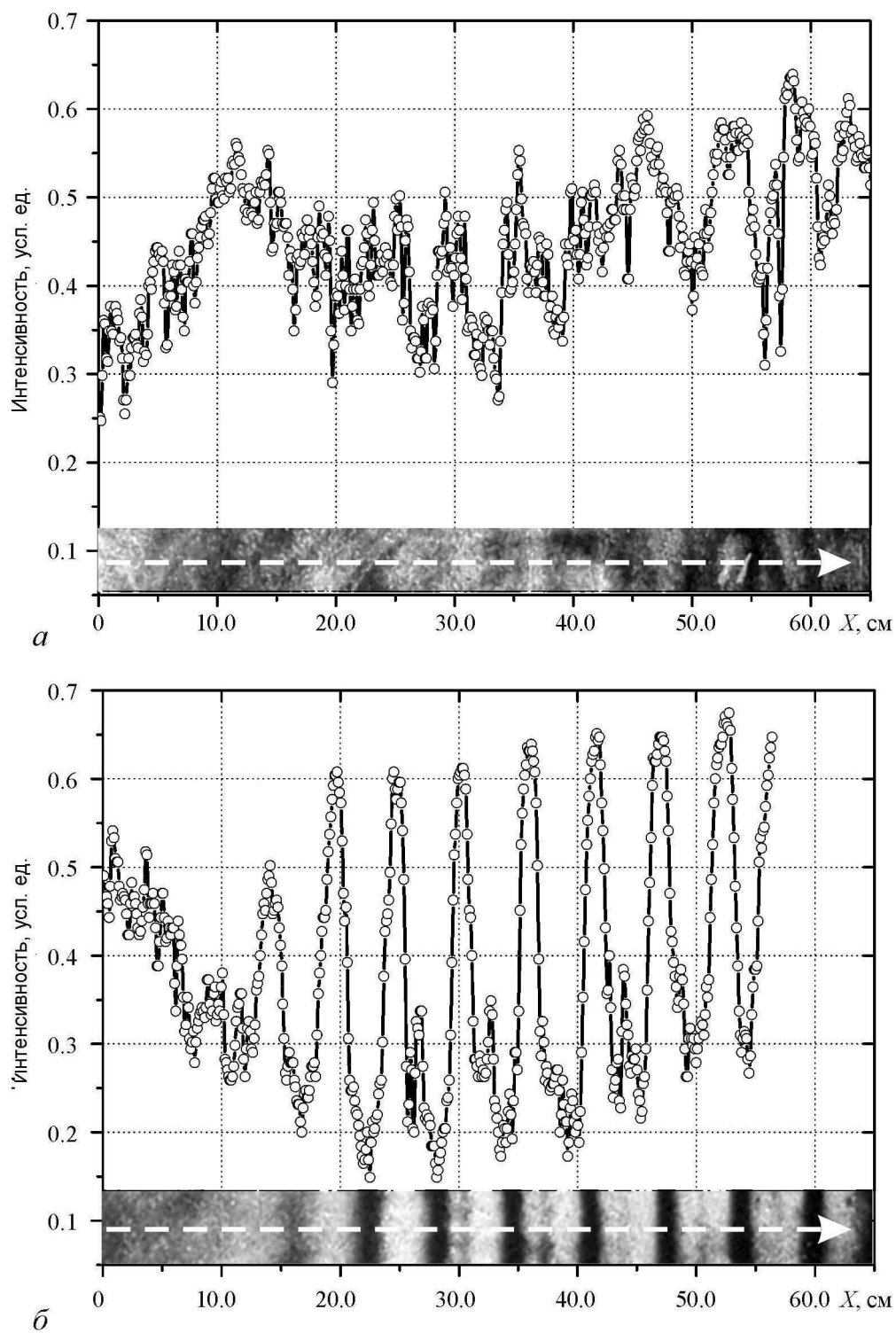


Рис. 11. Картина распределения интенсивности яркости частиц в структуре в радиальном сечении (реальные фото обрабатываемых секторов показаны внизу графиков) под действием спиральной волны в начальный (а) и конечный, через 21 с, (б) момент времени



полученный вычислением усредненной разницы между максимумами и минимумами в яркостной картине структуры частиц.

Сделаем оценку по переносу частиц потоком в вязкой жидкости. В вязкой жидкости частицы малого размера тонут со скоростью

$$V = \frac{2}{g} R^2 \frac{\rho_1 - \rho_2 g}{\rho_2 \nu}, \quad (4)$$

где  $\rho_1$  и  $R$  – плотность и радиус частицы,  $\rho_2$  и  $\nu$  – плотность и кинематическая вязкость жидкости, соответственно.

Если размер частицы приблизительно равен  $\delta \cdot 10^{-3}$  см, вязкость в 10 раз больше вязкости воды, а плотность в 5 раз превышает плотность жидкости, то скорость осаждения частиц будет приблизительно 0.5 см/с.

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  $V_2 \sim A\omega$ . При частоте накачки 30 Гц и амплитуде волны 0.5 мм вертикальная скорость  $V_2$  составит приблизительно 7.5 см/с. Если вертикальная компонента скорости  $V_2$  будет превышать 0.5 см/с, 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. 9, 10). Пусть переменная в пространстве часть высоты слоя частиц

$$\tilde{h} = A(z, t) \cdot f(R, \phi), \quad (5)$$

где  $A$  – огибающая амплитуды для известной функции  $f(R, \phi)$  возникающей в процессе неустойчивости, а волновое число периодической по  $x$  и  $y$  функции, описывающей изменение 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

$$\frac{dA}{dt} = \gamma - \alpha A^2, \quad (6)$$

где постоянные коэффициенты  $\gamma$  и  $\alpha$  находятся из эксперимента.

Например, для слоя жидкости толщиной 4 мм, толщине слоя частиц меньше критической и коэффициентах, равных 1 и 3, соответственно, уравнение (2) качественно хорошо описывает результаты эксперимента.

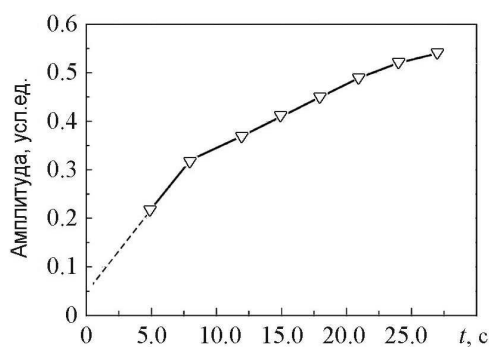


Рис. 12. Зависимость амплитуды периодической функции распределения частиц в пространстве от времени

Таким образом, из результатов эксперимента выяснилось, что процесс образования спиральных структур наблюдается в широкой области параметров. Эффект образования структур имеет пороговый характер и зависит от интенсивности поля стоячих волн. Обнаружено образование многозаходных спиральных структур из частиц. Установлено, что основными параметрами, которые влияют на качественно различное поведение системы, являются надкритичность и частота вынуждающей силы. Результаты эксперимента показали, что процесс образования спиральных структур наблюдается в широкой области параметров. Предложенные модельные уравнения качественно хорошо описывают поведение в системе.

### Заключение

Экспериментально исследована динамика роликовых доменов, которые возникают на поверхности жидкости большой вязкости при параметрическом возбуждении. Установлено, что в зависимости от граничных и начальных условий на краях кюветы возникают двумерные домены различной формы, а динамика доменов определяется движением их фронтов. В результате экспериментов обнаружен эффект мультивариантности сценариев перехода к устойчивому состоянию равновесия. Его особенность состоит в том, что при включении внешнего сигнала наблюдаются различные сценарии в динамике конкурирующих доменов при неизменных параметрах системы. Предложена модель наблюдаемого явления, численные расчеты в соответствии с которой хорошо согласуются с экспериментом.

Экспериментально исследована динамика роликовых структур параметрически возбуждаемых капиллярных волн на поверхности жидкости большой вязкости при многоугольной форме границ. Обнаружен эффект мультистабильности при которой возможно существование нескольких устойчивых роликовых режимов, отличающихся только ориентацией в пространстве. Исследована их устойчивость при отклонении роликов по углу от состояния равновесия. Предложена модель наблюдаемого явления, численные расчеты в соответствии с которой хорошо согласуются с экспериментом.

Результаты могут представлять интерес при исследованиях процессов установления устойчивых режимов в активных средах при сильной конкуренции и при исследовании формирования двумерных структур из проводящих частиц, способных рассеивать электромагнитные волны [22].

Экспериментально исследовано образование спиральных структур из тяжелых частиц под действием поля параметрически возбуждаемых спиральных волн. Процесс образования спиральных структур наблюдается в широкой области параметров. Эффект образования структур имеет пороговый характер и зависит от интенсивности поля стоячих волн. Обнаружено образование многозаходных спиральных структур из частиц. Установлено, что основными параметрами, которые влияют на качественно различное поведение системы, являются надкритичность и частота вынуждающей силы. Предложенные модельные уравнения качественно хорошо описывают поведение в системе.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН проект № 0035-2014-0007.*

## Библиографический список

1. *Rabinovich M.I., Ezersky A.B., and Weidman P.D.* The Dynamics of Patterns // World Scientific, Singapore, 2000.
2. *Захаров В.Е., Львов В.С., Мушер С.Л.* О нестационарном поведении системы параметрически возбужденных спиновых волн // Физика твердого тела. 1972. № 4. С. 2913.
3. *Езерский А.Б., Рабинович М.И., Реутов В.П., Старобинец И.М.* Пространственно-временной хаос в параметрически возбуждаемой капиллярной ряби // ЖЭТФ. 1986. 91. Вып. 6 (12). С. 2070.
4. *Ezersky A.B., Kiyashko S.V., Matusov P.A., Rabinovich M.I.* Domain, domain walls and dislocations in capillary ripples // Europhys. Lett. 1994. Vol. 26, № 3. Pp. 183–188.
5. *Ezersky A.B., Nazarovskiy A.V., Kiyashko S.V.* Bound states of topological defects in parametrically excited capillary ripples // Physica D. 2001. Vol. 152–153. Pp. 310–324.
6. *Афенченко В.О., Кияшко С.В., Пискунова Л.В.* Движение фронта при конкуренции роликовых доменов параметрически связанных волн // Изв. РАН Сер. Физ. 2004. Т. 68, № 12. С. 1771–1775.
7. *Кияшко С.В.* Динамика роликовых доменов параметрически возбуждаемых капиллярных волн // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. LI, № 4. С. 359–365.
8. *Кияшко С.В., Афенченко В.О., Назаровский А.В.* Динамика роликовых доменов параметрически возбуждаемых капиллярных волн при прямоугольной геометрии границ // Изв. вузов ПНД. 2013. Т. 21, № 6. С. 58–68.
9. *Kiyashko S.V., Afenchenko V.O., Nazarovskii A.V.* Dynamics of Roll Domains in a Rounded-Corner Cell // Physics of Wave Phenomena. 2014. Vol. 22, № 2. Pp. 132–139.
10. *Kiyashko S.V., Korzinov L.N., Rabinovich M.I., Tsimring L.S.* Rotating spirals in a Faraday experiment // Phys. Rev. E. 1996. Vol. 54, № 5. Pp. 5037–5040.
11. *Edwards W.S. and Fauve S.* Patterns and quasi-patterns in the Faraday experiment // J. Fluid Mech. 1994. Vol. 278. Pp. 123–148.
12. *Кияшко С.В., Афенченко В.О., Назаровский А.В.* Мультистабильность роликовых структур параметрически возбуждаемых капиллярных волн при многоугольной форме границ // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 6. С. 489.
13. *Ottino J.M.* The kinematics of mixing: stretching, chaos, and turbulence. Cambridge University press, Cambridge 1989.
14. *Gollub J.P.* Nonlinear waves: Dynamics and transport // Physica D. 1991. Vol. 51. P. 501.
15. *Mesquita O.N., Kane S., Gollub J.P.* Transport by capillary waves: Fluctuating Stokes drift // Phys. Rev. A. 1992. Vol. 45, № 6. P. 3700.
16. *Ramshankar R., Berlin D., Gollub J.P.* Transport by capillary waves. Part I. Particle trajectories // Phys. Fluids A 2. 1990. P. 1955.
17. *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.
18. *Езерский А.Б., Кияшко С.В., Назаровский А.В.* Перенос примеси топологическими дефектами поля параметрически возбуждаемой капиллярной ряби // Препринт № 506 ИПФРАН, 1999.

19. *Кияшко С.В., Аfenченко В.О., Назаровский А.В.* Спиральные структуры из тяжелых частиц при параметрическом возбуждении стоячих капиллярных волн // Изв. вузов ПНД. 2013. Т. 21, № 2. С. 201–208.
20. *Кияшко С.В., Назаровский А.В.* Структуры при параметрическом возбуждении капиллярной ряби в слое с периодической неоднородностью глубины // Изв. РАН Сер. Физ. 2000. Т. 64, № 12. С. 2405–2411.
21. *Матусов П.А., Цимринг Л.Ш.* Распространение фронта параметрически возбуждаемой капиллярной ряби // Препринт №225, Горький, ИПФ АН, 1988.
22. *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. Pp. 68–73.

*Поступила в редакцию 17.09.2016*

## **DYNAMICS OF ROLL DOMAINS AND THE FORMATION OF STRUCTURES OF PARTICLES IN PARAMETRIC EXCITATION OF CAPILLARY WAVES**

*S. V. Kiyashko, A. V. Nazarovsky*

Institute of Applied Physics of the RAS  
46 Ul'yanov Street, 603950, Nizhny Novgorod, Russia  
E-mail: kiyashko@appl.sci-nnov.ru, nazarovsky@appl.sci-nnov.ru

The proposed material is a review of the results of the study of the dynamics of roll domains of parametrically excited waves on the surface of the liquid. The processes of establishing regular wave patterns and structures from heavy particles produced by a field of standing waves are discussed from the standpoint of nonlinear dynamics.

In experimental studies, carried out over the past few years, a number of interesting results concerning the dynamics of roll domains and the formation of structures of particles at parametric excitation of capillary waves were obtained. The effect of multivariate scenarios of transition to a stable state of equilibrium was discovered, whose specific feature is that when an external signal is turned on there are various scenarios in the dynamics of competing domains at constant parameters of the system. On the surface of the liquid of high viscosity with a polygonal shape of boundaries the effect of multistability was detected, at which the existence of several stable roll regimes differing only in the orientation in space is possible. The formation of multiarmed spiral structures of heavy particles placed in a liquid layer on the surface of which capillary waves are parametrically excited was observed.

It is well known that the processes of occurrence, interaction, synchronization and destruction of spatial structures have similar dynamics in many systems (i.e., described by the same equations). But in some systems, the study of these processes can be associated with considerable difficulties. The results described in this review were obtained in the study of parametrically excited capillary ripples, which are very convenient objects for studying the pattern formation and the transition from regular structures to chaos because of its simplicity and at the same time a wide variety of observed effects. Taking this into account, we believe that the results described in the review will be important for understanding the processes taking place in various physical systems.

*Keywords:* Pattern formation, capillary waves, roll structures, domains competition, heavy particles, spiral structures, multistability.

DOI: 10.18500/0869-6632-2016-24-4-17-38

*Paper reference:* Kiyashko S.V., Nazarovsky A.V. Dynamics of roll domains and the formation of structures of particles in parametric excitation of capillary waves // Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2016. Vol. 24, № 4. P. 17–38.

## References

1. *Rabinovich M.I., Ezersky A.B., and Weidman P.D.* The Dynamics of Patterns // World Scientific, Singapore, 2000.
2. *Zakharov V.E., Lvov V.S., Musher S.L.* On non-stationary behavior of a system of parametrically excited spin waves // *Fiz. Tverd. Tela.* 1972. № 4. P. 2913. (in Russian)
3. *Ezersii A.B., Rabinovich M.I., Reutov V.P., Starobinets I.M.* Spatiotemporal chaos in the parametric excitation of a capillary ripple // *JETP.* 1986. Vol. 64, № 6. P. 1228.
4. *Ezersky A.B., Kiyashko S.V., Matusov P.A., Rabinovich M.I.* Domain, domain walls and dislocations in capillary ripples // *Europhys. Lett.* 1994. Vol. 26, № 3. Pp. 183–188.
5. *Ezersky A.B., Nazarovskiy A.V., Kiyashko S.V.* Bound states of topological defects in parametrically excited capillary ripples // *Physica D.* 2001. Vol. 152–153. Pp. 310–324.
6. *Afenchenko V.O., Kiyashko S.V., and Piskunova L.V.* Front Motion under Competition of Roll Domains of Parametrically Excited Capillary Wave // *Bull. of the RAS: Physics.* 2004. Vol. 68, № 12. P. 1987.
7. *Kiyashko S.V.* Dynamics of roll domains of parametrically excited capillary waves // *Radiophys. Quantum El.* 2008. Vol. 51. 324. doi:10.1007/s11141-008-9033-7
8. *Kiyashko S.V., Afenchenko V.O., Nazarovskiy A.V.* Dynamics of roll domains of parametrically excited capillary waves at the boundaries of the rectangular geometry // *Izvestiya VUZ. AND.* 2013. Vol. 21, № 6. Pp. 58–68. (in Russian)
9. *Kiyashko S.V., Afenchenko V.O., Nazarovskii A.V.* Dynamics of Roll Domains in a Rounded-Corner Cell // *Physics of Wave Phenomena.* 2014. Vol. 22, № 2. Pp. 132–139.
10. *Kiyashko S.V., Korzinov L.N., Rabinovich M.I., Tsimring L.S.* Rotating spirals in a Faraday experiment // *Phys. Rev. E.* 1996. Vol. 54, № 5. Pp. 5037–5040.
11. *Edwards W.S. and Fauve S.* Patterns and quasi-patterns in the Faraday experiment // *J. Fluid Mech.* 1994. Vol. 278. Pp. 123–148.
12. *Kiyashko S.V., Afenchenko V.O., Nazarovskiy A.V.* Multistability of roll structures of parametrically excited capillary waves in the boundaries of a polygonal form // *Izv. VUZ. Radiophys.* 2016. Vol. 59, № 6. P. 489. (in Russian)
13. *Ottino J.M.* The kinematics of mixing: stretching, chaos, and turbulence. Cambridge University press, Cambridge 1989.
14. *Gollub J.P.* Nonlinear waves: Dynamics and transport // *Physica D.* 1991. Vol. 51. P. 501.
15. *Mesquita O.N., Kane S., Gollub J.P.* Transport by capillary waves: Fluctuating Stokes drift // *Phys. Rev. A.* 1992. Vol. 45, № 6. P. 3700.
16. *Ramshankar R., Berlin D., Gollub J.P.* Transport by capillary waves. Part I. Particle trajectories // *Phys. Fluids A 2.* 1990. P. 1955.
17. *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.
18. *Ezersky A.B., Kiyashko S.V., Nazarovskiy A.V.* Transport of impurities by topological

defects of field parametrically excited capillary ripples // Preprint N. 506 IAP RAN, 1999. (in Russian)

19. *Kiyashko S.V., Afenchenko V.O., Nazarovskiy A.V.* The spiral structures of the heavy particles in parametric excitation of standing capillary waves // *Izvestiya VUZ. AND.* 2013. Vol. 21, № 2. P. 201–208.
20. *Kiyashko S.V., Nazarovskiy A.V.* Structures in parametric excitation of capillary ripples in the layer with aperiodic depthinhomogeneity // *Izv. RAN Ser. Fiz.* 2000. Vol. 64, № 12. P. 2405–2411. (in Russian)
21. *Matusov P.A., Tsimring L.Sh.* The propagation of the front of parametrically excited capillary ripples // Preprint N. 225, Gorky, IAP AN, 1988. (in Russian)
22. *Afenchenko V.O., Ezerskiy 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. Pp. 68–73.



*Кияшко Сергей Васильевич* – родился в 1942 году. Закончил 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 (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, БОКС-120, ул. Ульянова, 46  
Институт Прикладной физики РАН  
E-mail: kiyashko@appl.sci-nnov.ru



*Назаровский Александр Владимирович*, родился в 1974 году. Окончил радиофизический факультет Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (1998). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата 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, БОКС-120, ул. Ульянова, 46  
Институт Прикладной физики РАН  
E-mail: nazarovskiy@appl.sci-nnov.ru