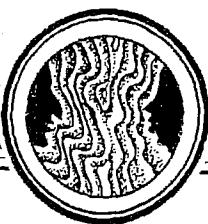


Фарадей был великим мастером кухонной физики. Если верно, что этапы познания природы человечеством соответствуют различным стадиям человеческого возраста, то юношеское восторженно-всеобъемлюще-всеохватывающее отношение к Природе, нашедшее выражение в создании стройных философских систем - от греков до Гегеля - сменилось в XIX веке трезвым стремлением взрослого человека к планомерному и систематическому обустройству своего очага во всех смыслах этого слова - от кухонного до жертвенного. Лаборатории тогдашних химиков-физиков (разница тогда была не очень велика, и Фарадей начал с открытия бензола и бутилена) еще не потеряли внешнего сходства с кухней средневекового алхимика и можно считать, что наука об электричестве родилась, когда Зевесов огонь удалось запахнуть в кухонную склянку (с гордым названием Лейденская банка).

Фарадей общался с природой на самом бытовом, приземленном уровне - недаром молодого Гельмгольца поразили те проволочки и кусочки дерева, с помощью которых Фарадею удавалось выведывать совершенно непредсказуемые и, казалось бы, непостижимые тайны природы. Представляется символичным, что именно обыкновенную свечу выбрал Фарадей в своих знаменитых научно-популярных лекциях в качестве объекта проявления (выявления, высветления) основных физических и химических законов.

Публикуемая ниже статья - еще один пример блестящего предвидения Фарадея, достигнутого с помощью кусочков стекла, пальцев и все той же излюбленной свечи!



САМООРГАНИЗАЦИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ФАРАДЕЯ ПО ПАРАМЕТРИЧЕСКОМУ ВОЗБУЖДЕНИЮ КАПИЛЛЯРНОЙ РЯБИ

А.Б. Езерский

На основе дневниковых записей М.Фарадея показано, что в его экспериментах с параметрически возбуждаемой капиллярной рябью был установлен факт существования структур, вид которых в широкой области параметров не зависел от начальных и граничных условий, а также физических свойств жидкостей.

Имя Майкла Фарадея у тех, кто занимается физикой, ассоциируется прежде всего с открытием таких явлений, как электромагнитная индукция, поляризация света, законы электролиза, диа- и парамагнетизма. Его исследования, касающиеся класса явлений, который сейчас называется нелинейной динамикой структур и самоорганизацией в неравновесных средах, известны значительно меньше. В монографиях по синергетике и диссипативным структурам [1, 2] обычно ссылаются на опыты Бенара (1901) по термоконвекции в слое жидкости, где возникают шестигранники [3], эксперименты с вихрями Куэтта - Тейлора между вращающимися цилиндрами или с дорожкой Кармана за плохо обтекаемыми телами как на первые эксперименты по изучению упорядоченных структур в неравновесных гидродинамических системах. Однако, именно Фарадей, по крайней мере, на 70 лет раньше Бенара, в 1831 году первый описал явление самоорганизации в неравновесной среде - в системе параметрически возбуждаемых капиллярных волн.

Фарадей обнаружил [4], что на поверхности протяженного слоя жидкости, колеблющегося вертикально, возникает капиллярная рябь, образующая структуру в виде паркета из квадратных клеток. Такая структура состоит из двух взаимно ортогональных пар стоячих волн; частота капиллярных волн, составляющих эту структуру, равна половине частоты внешней силы. Возбуждение каждой пары аналогично параметрическому возбуждению маятника с колеблющейся вертикально точкой подвеса. В жидком слое, характерные горизонтальные размеры которого значительно больше длины волны, все направления равноправны, и параметрически возбуждаться могут пары с произвольной ориентацией волнового вектора. В экспериментах Фарадея [4, 5] азимутальная симметрия разрушалась, и реализовалась всегда квадратная структура. Экспериментально было выяснено, что такая структура капиллярной ряби не зависела от начальных возмущений, а в определенных пределах и от физических свойств жидкости и геометрической формы кюветы, в которой проводились опыты. Это, по-видимому, были первые осмысленные эксперименты по самоорганизации в неравновесных диссипативных системах (источником энергии здесь является поле накачки, а диссипация обусловлена вязкостью жидкости).

Результаты экспериментов были опубликованы Фарадеем в сжатом виде как приложение к статье [4]. Сохранились и дневники [5], где Фарадей очень подробно описал все свои наблюдения.

В этой статье мы попытаемся проследить за тем, как Фарадей исследовал структуру параметрически возбуждаемой капиллярной ряби, опираясь именно на его записи в дневнике. По дневнику можно понять ход рассуждений выдающегося экспериментатора, что представляется, на наш взгляд, интересным не только с исторической точки зрения, но очень поучительным для тех, кто занимается экспериментом с диссипативными структурами. Многие эксперименты с капиллярной рябью были повторены совсем недавно на более высоком техническом уровне [6-10]; с точки зрения идей эти эксперименты были очень близки тем, что были сделаны более 160 лет назад Фарадеем.

Установка для изучения параметрического возбуждения капиллярной ряби, использованная Фарадеем, была очень проста. В его экспериментах для создания колебаний применялись горизонтально расположенные стеклянные или деревянные пластинки, один конец или оба конца которых были жестко закреплены. В пучность изгибных колебаний, которые возбуждались в таких пластинах, прикреплялась кювета с жидкостью (рис. 1, а). В некоторых экспериментах кювета не использовалась, жидкость просто наливалась на пластину (она не растекалась за счет плохой смачиваемости). Чтобы иметь возможность изменять форму жидкого слоя, Фарадей помещал на пластину кусочки стекла, на которые разливалась жидкость. Жидкий слой покрывал всю поверхность такой подложки и повторял ее форму.

Для возбуждения колебаний Фарадей не располагал какими-либо вибраторами. Создание периодических колебаний в его опытах было возможно благодаря ловкости его рук - он тер влажным пальцем по стеклу и возбуждал колебания пластины на резонансной частоте. В некоторых экспериментах Фарадей в качестве источника периодических колебаний использовал камертон. За счет его большой добротности затухание колебаний происходило достаточно медленно, и он мог в течение определенного времени наблюдать за структурами на поверхности жидкости.

Для визуализации ряби использовалась свеча, изображение которой отражалось от поверхности жидкости. При возбуждении ряби на поверхности жидкости, налитой на стеклянную пластину, изображение создавалось за счет прошедшего через слой жидкости света: «Если помещать свечу непосредственно под пластиной и держать экран из бумаги в дюйме над ней, получается прекрасная

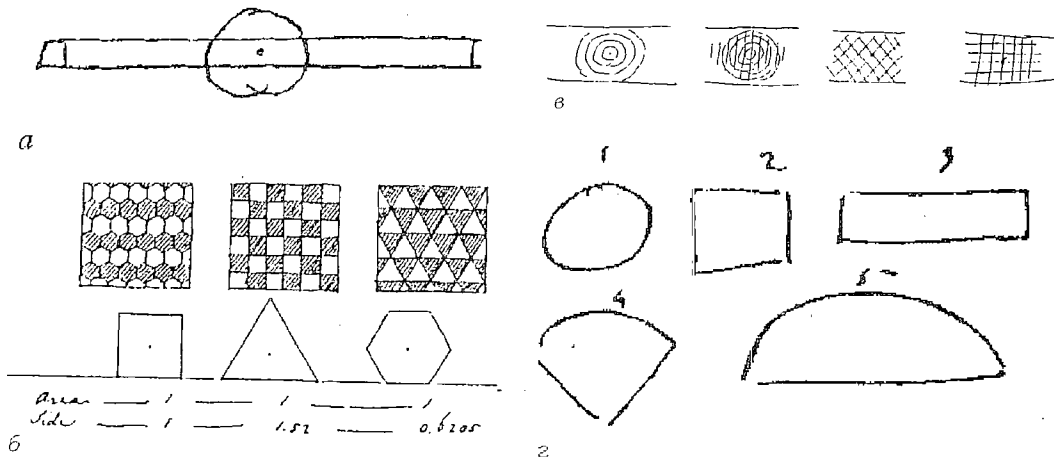


Рис. 1. Копии рисунков из дневника М. Фарадея [5]: а - кювета, закрепленная на упругой пластине; б - возможный вид структур параметрически возбуждаемой капиллярной ряби; в - эволюция структур во времени при возникновении квадратной решетки; г - форма резонаторов, используемых в экспериментах Фарадея

картина. Каждое возвышение давало в своем фокусе изображение в виде звездочки, которая мерцала, то есть появлялась и исчезала непрерывно по мере того как возвышение увеличивалось или уменьшалось ... Это было исключительно красиво и легко можно сделать доступным для наблюдения большой аудитории» (цит. по [5, §73]). Сейчас такая схема визуализации (теневой метод) используется во многих работах по капиллярной ряби [9,11].

Фарадей возбуждал капиллярную рябь на поверхности многих жидкостей - воды, молока, спирта, масла, чернил, яичного белка, ртути. В его экспериментах, «... структура ряби почти всегда четырехугольная, форма всегда правильная, но слегка модифицированная у края воды или жидкости ...» [5, § 2]. Проблема, которую Фарадей сформулировал предельно четко, как только этот результат был подтвержден им во многих экспериментах, состояла в том, почему же именно квадратная структура наиболее предпочтительна? Может ли реализоваться система из роликов, треугольников или шестиугольников?

Рассуждения Фарадея о том, какая структура наиболее предпочтительна, состояли в следующем: «Совершенно очевидно, что квадратная форма ряби - системы капиллярных волн - весьма естественна из-за того, что расстояние, которое должны преодолеть частицы, двигаясь в этой структуре, является наименьшим из расстояний, возможных в структурах такого вида, то есть если рассматривать отношение числа направлений, по которым двигаются частицы, к числу всех возможных направлений. В такой структуре разделительные линии (линии узлов) также наиболее короткие, есть также и другие физические причины, которые необходимо рассмотреть в дальнейшем» [5, § 14]. Более развернутого доказательства наибольшей предпочтительности квадратных решеток Фарадей не приводил. Картинка, которая в дневниках Фарадея сопровождает эту цитату, представлена на рис. 1, б. Совершенно очевидно, что длина разделительных линий (периметр элементарной ячейки для паркетов на рис. 1, б) при фиксированной площади ячейки минимален для шестиугольника, а не для квадрата. Более того, при параметрическом возбуждении частота внешней силы определяет длину волны капиллярных волн, поэтому сравнение структур необходимо проводить не при фиксированной площади, а при фиксированном периоде структуры. Из-за этого приведенные выше качественные объяснения Фарадея, почему возникают именно квадраты, нельзя признать удовлетворительными.

Теоретическое исследование вопроса о том, какая из структур капиллярной ряби наиболее предпочтительна при параметрической генерации в пространственно протяженной системе, и к настоящему времени не доведено до конца. Как показано недавно в работе [12] при малых надкритичностях (под надкритичностью понимается величина $\epsilon = a/a_{п} - 1$, где a - амплитуда ускорения жидкого слоя, $a_{п}$ - порог параметрической генерации) уравнения, описывающие ансамбль капиллярных волн, могут быть получены варьированием диссипативной функции (ляпуновского функционала). В этом приближении задача об определении наиболее предпочтительной структуры капиллярной ряби аналогична исследованию проблемы отбора структур в слое жидкости, подогреваемом снизу [13]. Как показано в [12], при параметрическом возбуждении волны среди валов, гексагональных решеток и четырехугольников последняя из структур соответствует самому глубокому минимуму диссипативной функции. Что же означает этот результат? Представим, что на систему, описываемую диссипативной функцией, действует случайная внешняя сила. Система под действием этой силы может переходить из одного состояния в другое. Задача о нахождении вероятности пребывания в окрестности состояний равновесия может быть точно решена [1]. Если грубо сформулировать результат расчета, то он заключается в следующем. При воздействии шумов система проводит больше всего времени вблизи состояния равновесия, соответствующего наиболее глубокому минимуму диссипативной функции. Вывод, сделанный в работе [12], что наиболее предпочтительна четырехгранная структура, говорит о том, что она лишь наиболее вероятна среди других совершенных структур (валов,

шестигранников) и не затрагивает вопроса, насколько она, например, более вероятна, чем структуры с амплитудной модуляцией или структуры с дефектами. Более того, при таком подходе полностью игнорируется, какую область притяжения в пространстве начальных условий имеет та или иная структура. Можно, в принципе, предположить, что какая-либо структура имеет большую область притяжения, но не слишком глубокий минимум. Тогда именно эта структура будет наиболее вероятна, если, конечно, шумы не велики.

Как выяснено недавно в [11], кроме квадратов при параметрическом возбуждении волн возможно возникновение и шестигранных структур, образованных тремя парами волн, ориентированными под углом 120° . Более того, если спектр внешней силы состоит из синхронизованных по фазе гармоник [14], частоты которых относятся как $\omega_1 : \omega_2 = m:n$ (m, n - целые числа), то возможно возникновение структур, напоминающих квазикристаллы, открытые недавно в физике твердого тела. Под квазикристаллом в случае параметрического возбуждения ряби подразумевается случай, когда пары стоячих волн равномерно распределены по азимуту; угол между направлением распространения волн в соседних парах составлял $2\pi/k$, k - целое число. Поле капиллярной ряби обладает при этом поворотной симметрией, но не имеет при $k > 4$ трансляционной симметрии - пространственного периода. Это, очевидно, связано с тем, что плоскость может быть плотно заполнена лишь правильными треугольниками, квадратами или правильными шестиугольниками. При параметрическом возбуждении волн наблюдались структуры с симметрией, например, двенадцатого порядка ($k=12$) (рис. 2), если соотношение частот гармоник было $m:n = 4:5$ [14]. Отметим, что в достаточно узкой области параметров квазикристаллические структуры могут наблюдаться на поверхности капиллярной ряби, если накачка чисто гармоническая [11] ($k=8$), однако структурой, реализующейся в наиболее широкой области контролируемых параметров, является квадратная решетка.

Каким же образом система из начального состояния переходит в квадратную решетку? Эта проблема специально изучалась Фарадеем. Как указывалось в [5], «возбуждение ряби обычно начинается с цилиндрических волн, но есть тенденция к образованию линейных параллельных друг другу фронтов; это разрушает круги и они сами разрушаются, производя независимые возмущения, сначала весьма нерегулярные, но почти мгновенно приходящие к квадратным структурам, ориентированным под углом 45° к краям пластины, а затем структуры поворачивались на 45° и становились параллельными краям пластины; хотя иногда наблюдалось и вращение в противоположную сторону, тенденция к ориентации фронтов параллельно краям пластины сохранялась». Временная последовательность наблюдавшихся в эксперименте структур, зарисованная Фарадеем, показана на рис. 1, в.

Детальное изучение того, как из начальных возмущений возникает квадратная решетка, проведено недавно в [15], где исследовалось распространение фронта параметрической неустойчивости в круглой кювете. При включении внешнего источника возмущения генерировались у краев кюветы, а фронт распространялся к центру. Скорость распространения фронта не совпадала с групповой скоростью капиллярных волн, а зависела от величины надкритичности. Этот результат хорошо совпадает с выводами

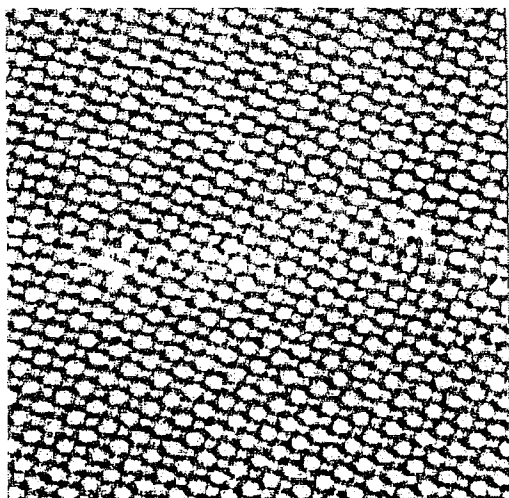


Рис. 2. Квазикристалл с симметрией двенадцатого порядка [14]

теории, развитой в этой работе. Как показано там же экспериментально, цилиндрические волны параметрически возбуждаемой капиллярной ряби неустойчивы. Еще до того, как фронт параметрической неустойчивости достигает центра кюветы, на фоне цилиндрических фронтов, повторяющих форму краев кюветы, возникает система волн со взаимно ортогональными фронтами. Разрушение цилиндрической моды начинается у краев кюветы и распространяется к центру. В результате разрушения аксиально симметричной моды возникает структура из двух взаимно ортогональных пар.

Определяется ли структура капиллярной ряби формой кюветы? Чтобы получить ответ на этот вопрос, Фарадей провел следующий эксперимент [5, § 92]: «Несколько кусочков стекла различной формы (рис. 1, г - А.Б.Е.) были помещены на колеблющуюся пластинку и покрыты водой. Во всех случаях наблюдалась тенденция к возникновению четырехугольников: в случаях 1, 2, 3 они возникали достаточно легко и почти всегда были одни и те же; в случаях 2 и 3 линии пучностей были развернуты чаще всего под углом 45° к боковым сторонам. Для случаев 4 и 5 структура была более нерегулярна и ее возникновение начиналось по-разному. Очевидно, что форма пластины и краев жидкого слоя оказывала влияние на конечную структуру ряби». Наибольшей сложностью в изучении капиллярной ряби было то, что четырехугольная структура наблюдалась лишь как тенденция - в экспериментах Фарадея обычно не возникал паркет из совершенных четырехгранников - всегда имели место нарушения порядка, которые обычно существовали в окрестности боковых границ. Все нарушения совершенной структуры Фарадей приписывал именно воздействию краев жидкого слоя. Как отмечалось им в [5, § 58]: «Однако, кроме нерегулярности краев, структура может быть представлена как квадратная».

Хотя края кюветы действительно являются источником возмущений, не это является определяющим для нарушений порядка совершенных структур, существующих в пространственно протяженных системах. Как показано в работе [7], возникновение пространственно неупорядоченных состояний связано с нелинейной динамикой капиллярной ряби. Экспериментально выяснено, что в квадратной решетке, образованной двумя взаимно ортогональными парами стоячих волн, каждая из пар неустойчива по отношению к возникновению поперечной модуляции. Такая модуляция (рис. 3) возникает при достаточно малой надкритичности, с ростом надкритичности волны огибающих становятся нерегулярными и в системе параметрически возбужденных капиллярных волн возникает хаос. Свойства такого пространственно-временного хаоса изучались в [6,7,10]. Показано, например, что даже при больших надкритичностях структура в виде двух взаимно ортогональных пар волн сохраняется, хотя спектр модуляции достаточно широкий. Расчет пространственной корреляционной функции [10] показал, что в системе капиллярных волн может наблюдаться явление, напоминающее фазовый переход: с увеличением надкритичности длина пространственной корреляции, составляющая $40-50 \lambda$ (λ - длина капиллярной волны) скачком уменьшается до нескольких длин волн.

На основе экспериментов [7] было предложено модельное уравнение (модифицированное уравнение Гинзбурга - Ландау), описывающее переход от регулярной структуры капиллярной ряби к пространственному беспорядку.

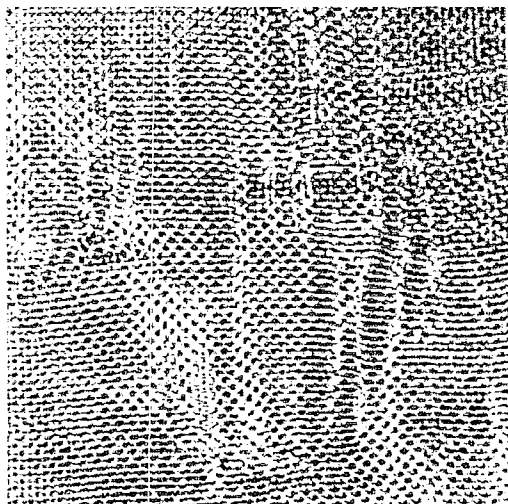


Рис. 3. Капиллярная рябь с модуляцией [7]

$$\frac{\partial a}{\partial t} - \frac{i}{2} \frac{v_g}{k} \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} + \gamma a = iHa^* - i\beta a + i\sigma |a|^2.$$

Здесь a - амплитуда капиллярных волн в паре, t - время, y - поперечная по отношению к направлению распространения волн координата, v_g - групповая скорость волн, k - волновое число, γ - затухание, H - коэффициент взаимодействия с полем накачки, β - расстройка от точного синхронизма с частотой поля накачки, σ - коэффициент, отвечающий за нелинейный сдвиг частоты. Применение этого уравнения к описанию пространственной модуляции ряби базируется на том, что взаимодействием волн огибающих, распространяющихся на фоне каждой из взаимно ортогональных пар капиллярных волн, образующих квадратную решетку, можно пренебречь [7].

При увеличении параметра H (амплитуды внешней силы) в уравнении наблюдается переход от регулярной пространственной модуляции к хаотической модуляции, характеризующейся сплошным спектром колебаний в фиксированной точке и сильно спадающей пространственной корреляционной функцией. Такая же последовательность бифуркаций наблюдалась и в экспериментах [7,10].

Таким образом, возникновение пространственно-временного хаоса параметрически возбуждаемой ряби не связано с воздействием случайных возмущений, а обусловлено собственной динамикой системы капиллярных волн.

При проведении экспериментов с капиллярной рябью Фарадей изучал движение частиц, которые располагались у дна (песок) или у поверхности (ликоподий). Наблюдение за переносом примеси капиллярной рябью и за полем освещенности поверхности, на которой возбуждены капиллярные волны, позволяло ему проводить визуализацию структур двумя независимыми методами. Как показано в [5, §§ 43,44]: «При распределении ликоподия на поверхности воды и песка на дне, ликоподий мог образовывать пересекающиеся линии, достаточно широкие, но он не оставался на этих линиях, которые были параллельны линиям распределения песка на дне. Когда обе системы линий были хорошо сформированы, то они в точности совпадали, но в распределениях песка гораздо лучше проявлялись структуры ... Ликоподий двигался почти по всей поверхности воды вначале достаточно быстро, так как если бы его движение не было вызвано рябью и было обусловлено другой причиной. Поверхность воды была в движении, и на это движение не влияли форма и месторасположение возвышений ряби, так как движение ликоподия происходило во всевозможных направлениях, тогда как положение возвышений капиллярной ряби было фиксировано в пространстве. Направление колебаний стекла - дуновения воздуха, и т.д. возможно были причиной, вызывающей это явление». Здесь, также как и при изучении возникновения структур, Фарадей объясняет неупорядоченный транспорт примеси воздействием случайных внешних возмущений. Как обнаружено совсем недавно, даже регулярные в пространстве и времени гидродинамические поля могут вызывать хаотический перенос частиц.

Изучение движения примеси в параметрически возбуждаемой капиллярной ряби проводилось недавно в работах [16,17]. В экспериментах изучалось движение как отдельной частицы, плавающей на поверхности жидкости [16], так и облака частиц [17]. Для этого в жидкость добавлялась флуоресцирующая краска, а световой нож осуществлял подсветку распределения краски на фиксированной глубине. В экспериментах изучалось, как зависит характер движения частиц от режима, реализующегося в системе параметрически возбужденных волн. Как установлено в этих экспериментах, при малых надкритичностях, когда поле капиллярной ряби промодулировано почти регулярно, в системе может наблюдаться аномальная диффузия: квадрат среднего смещения r частицы увеличивается как $\langle r^2 \rangle \sim t^\gamma$, где $\gamma > 1$. Нормальная диффузия ($\gamma=1$), которая также имеет место в системе капиллярных волн, реализуется при больших надкритичностях, когда поле ряби хаотически модулировано [17].

Теоретическая модель для описания аномальной диффузии примеси была разработана недавно в [18]. Как показано в этой работе, регулярная поперечная амплитудная модуляция капиллярных волн в каждой паре может приводить к аномальной диффузии примеси. Частицы, помещенные на поверхность, могут в течение довольно длительного времени двигаться равномерно прямолинейно, что называется полетами Леви. Именно с наличием таких движений связано возникновение аномальной диффузии частиц в параметрически возбуждаемых волнах [18].

Таким образом, капиллярная рябь, наряду с другими системами - термоконвекцией в слое жидкости, подогреваемом снизу, или электрогидродинамической конвекцией в жидких кристаллах, представляется очень удобной для изучения самоорганизации в нелинейных средах. При параметрическом возбуждении волн можно легко создать протяженную систему, длина которой значительно больше, чем пространственный период возмущений, можно легко менять контролируемые параметры - надкритичность, частоту и спектральный состав внешней силы, а также параметры жидкости - вязкость, поверхностное натяжение и т.д.

Существенной особенностью самоорганизации в системе параметрически возбуждаемой капиллярной ряби по сравнению с термоконвекцией является то, что в этой гидродинамической системе формирование структур происходит благодаря взаимодействию распространяющихся возмущений - поверхностных волн. Это приводит к новым эффектам, например, возможности управления пространственной структурой паттерна за счет изменения временного спектра параметрической накачки.

Изучение параметрического возбуждения волн проводится сейчас многими группами исследователей [19-23]. Акцент при этом делается на две фундаментальные проблемы нелинейной физики: в результате каких процессов из первоначально случайных возмущений в физических системах появляются пространственно организованные поля и напротив - каким образом регулярные в пространстве движения становятся случайными. Недавно, например, было экспериментально обнаружено [19], что при параметрическом возбуждении капиллярной ряби в жидких слоях малой (по сравнению с длиной волны) глубины могут существовать дислокации, обладающие топологическим зарядом (рис. 4). Как показано в работе [23], при сближении дислокаций они аннигилируют и структура становится совершенной. Пространственно-временной хаос, возникающий при увеличении надкритичности в этом случае, может быть представлен как ансамбль таких взаимодействующих дислокаций. Переход от случайных в пространстве возмущений к ансамблю взаимодействующих дислокаций может происходить через формирование в решетках капиллярных волн линейной цепочки дислокаций - доменных стенок - границ, разделяющих области, внутри которых структура поля совершенна. Здесь возникает ряд очень интересных проблем: как взаимодействуют дислокации с доменными стенками и с волнами модуляции? Возможна ли взаимная трансформация дислокаций и волн модуляции? Существуют ли дислокации в квазикристаллических структурах?

В заключение отметим, что Фарадей был первым, кто установил, что возникновение квадратной струк-

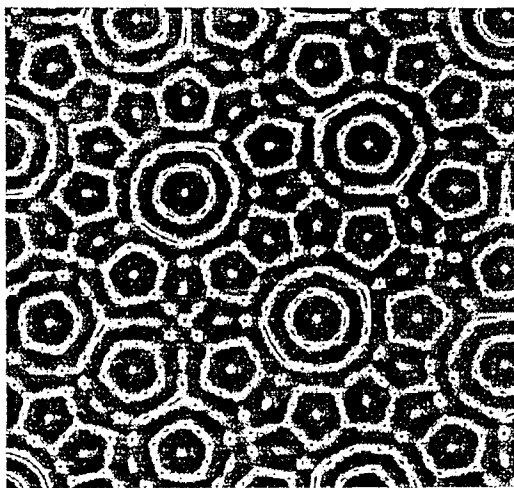


Рис. 4. Дислокации с противоположными топологическими зарядами [23]

туры при параметрическом возбуждении ряби обусловлено не формой кюветы и не зависит от сорта жидкости, а определяется только характером взаимодействия капиллярных волн. Фарадей даже употреблял выражение «... arranged itself ...» [5, § 119], что близко к используемому сейчас термину «самоорганизация». Однако он не сделал никаких обобщений из своих экспериментов и никогда не возвращался после 1831 года к изучению капиллярной ряби. Что также ясно из описания его экспериментов, он сводил возникновение неупорядоченных движений к воздействию возмущений - неровных краев, возмущений, вносимых движением воздуха. По всей видимости, Фарадею легче было принять идею о самоорганизации - существовании в Природе тенденции к возникновению пространственно упорядоченных структур из начального случайного состояния, - чем идею о возможности возникновения неупорядоченных движений, возникающих как результат нелинейной динамики системы.

Автор признателен Ю.А. Данилову и Д.И. Трубецкову за предложение написать эту работу и М.И. Рабиновичу за постоянный интерес и ценные замечания.

Библиографический список

1. *Haken G.* Спиргетика. М.: Мир, 1980.
2. *Manneville P.* Dissipative structures and weak turbulence. Boston- Toronto: Academic Press, 1990.
3. *Benar H.* Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide transportant de la chaleur par convection en regime permanent // Ann. Chim. Phys. 1901. (7). Vol. 23. P. 62.
4. *Faraday M.* On a peculiar class of acoustical figures; and on certain forms assumed by groups of particles upon vibrating elastic surfaces // Philos. Trans. R. Soc. London, 1831. Vol. 121. P. 299.
5. Entry in Faraday's Diary/ Ed. T. Martin. London: G. Bell, 1932.
6. *Езерский А.Б., Короткий П.И., Рабинович М.И.* Хаотическая автомодуляция двумерных структур на поверхности жидкости при параметрическом возбуждении // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 41, вып. 4. С. 129.
7. *Езерский А.Б., Рабинович М.И., Реутов В.П., Старобинец И.М.* Пространственно-временной хаос параметрически возбуждаемой капиллярной ряби // ЖЭТФ. 1986. Т. 91, вып. 6(12). С. 2070.
8. *Левин Б.В., Трубишков Б.А.* Фазовые переходы в решетке параметрических волн на поверхности колеблющейся жидкости // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 44, вып. 7. С. 311.
9. *Tufillaro N.B., Ramshankar R., Gollub J.P.* Order-disorder transition in capillary ripples // Phys. Rev. Lett. 1989. Vol. 62. P. 422.
10. *Douady S., Fauve S.* Pattern selection in Faraday instability // Europhys. Lett. 1988. Vol. 6, №3. P. 221.
11. *Christiansen B., Alrom P., Levinsen M. T.* Ordered capillary-wave states: Quasicrystals, hexagons, and radial waves // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 68, № 14. P. 2157.
12. *Milner S.T.* Square patterns and secondary instabilities in driven capillary waves // J. Fluid Mech. 1991. Vol. 225. P. 81.
13. *Сазонов А.Г.* К проблеме отбора конвективных структур в жидкости с зависимостью вязкости от температуры // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1980. Т. 166, № 5. С. 463.
14. *Edwards W.S., Fauve S.* Parametrically excited quasicrystalline surface waves // Phys. Rev. E. 1993. Vol. 47. P. 788.
15. *Matusov P.A., Tsimring L.Sh.* The propagation of the front of parametrically excited capillary ripples. Nonlinear Waves III // Ed. A.V. Gaponov-Grekhov. Berlin: Springer - Verlag. 1990. P. 98.
16. *Ramshankar R., Berlin D., Gollub J.* Transport by capillary waves. Part I: Par-tical trajectories // Phys. Fluids. A. 1990. Vol. 2. P. 1955.

17. *Ramshankar R., Gollub J.* Transport by capillary waves. Part II: Scalar dispersion and structure of the concentration field // *Phys. Fluids. A.* 1991. Vol. 3, № 5. P. 1344.

18. *Aranson I.S., Ezersky A.B., Rabinovich M.I., Tsimring L.Sh.* Impurity transport in parametrically excited capillary ripples // *Phys. Lett. A.* 1991. Vol. 153, № 4,5. P. 211.

19. *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. P. 183.

20. *Muller H.W.* Periodic triangular patterns in the Faraday experiment // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 71, № 20. P. 3287.

21. *Bosch E., van de Water W.* Spatiotemporal intermittency in the Faraday experiment // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 70, № 22. P. 3420.

22. *Gluckman B.J., Marcq P., Bridger J. and Gollub J.* Time averaging of chaotic spatio-temporal wave pattern // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 71, № 13. P. 2034.

23. *Ezersky A.B., Ermoshin D.A., Kiyashko S.V.* Dynamics of defects in parametrically excited capillary ripples // Submitted to *Phys. Rev. E.*

*Институт прикладной физики РАН
Нижний Новгород*

Поступила в редакцию 15.09.94

SELF-ORGANIZATION IN FARADAY'S EXPERIMENTS ON PARAMETRIC EXCITATION OF CAPILLARY RIPPLES

A.B. Ezersky

On the basis of Faraday's diary concerning parametric excitation of capillary ripples it is shown that he discovered the existence of the structures which characteristics are independent of initial and boundary conditions and liquid properties in a wide range of parameters.



Езерский Александр Борисович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института прикладной физики РАН. Окончил радиофизический факультет Горьковского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (1976). Область научных интересов - гидродинамические неустойчивости, взаимодействие вихрей с акустическими волнами, формирование структур. Имеет более 60 публикаций.