

## Экспериментальное моделирование генерации вихревого течения на поверхности воды волновым каскадом

С. В. Филатов<sup>+</sup>, А. В. Орлов<sup>+</sup>, М. Ю. Бражников<sup>+</sup>, А. А. Левченко<sup>+\*1)</sup>

<sup>+</sup>Институт физики твердого тела РАН, 142432 Черноголовка, Россия

\*Астраханский государственный университет, 414056 Астрахань, Россия

Поступила в редакцию 6 августа 2018 г.

После переработки 12 сентября 2018 г.

Экспериментально исследована генерация вихревого течения волнами на поверхности воды, моделирующими каскад энергии в системе гравитационных волн на частотах 3, 4, 5 и 6 Гц. Установлено, что при накачке на поверхности распространяются волны под различными углами к волновому вектору основной моды, наблюдается нелинейное взаимодействие волн, приводящее к генерации новых гармоник. Показано, что крупномасштабные течения формируются модами наименьшей частоты в 3 Гц, но пересекающимися под острыми углами. Распределение энергии вихревого движения можно описать степенной функцией волнового вектора, и оно не зависит от распределения энергии в системе поверхностных волн. Энергия, которая поступает в крупномасштабные вихревые течения непосредственно из волновой системы, передается в малые масштабы. В системе вихрей устанавливается не обратный, а прямой поток энергии.

DOI: 10.1134/S0370274X18200055

**Введение.** В лабораторных условиях волны на поверхности жидкости, ограниченной размерами экспериментального сосуда, возбуждаются в результате действия переменной силы, сосредоточенной, как правило, в конечном интервале волновых векторов. В эксперименте применяются различные методы генерации волн: волнопродукторы, виброплатформы, переменное электрическое поле [1–3]. При накачке в систему поверхностных волн вводится энергия, которая в силу нелинейного взаимодействия волн распространяется из области накачки в область диссипации: в сторону больших волновых векторов – прямой каскад, и в сторону малых волновых векторов – обратный каскад.

Теория слабой волновой турбулентности [4], развитая для слабо взаимодействующих нелинейных волн, предсказывает степенной характер распределения энергии в каскаде по волновым векторам. Для гравитационных волн распределение энергии в прямом каскаде описывается степенной функцией  $E(k) \propto k^{-5/2}$ , а в обратном каскаде  $E(k) \propto k^{-7/3}$ , при этом сохраняется постоянным поток волнового действия. В диапазоне больших волновых векторов для капиллярных волн, распределение энергии, возможное только в прямом каскаде, пропорциональ-

но  $E(k) \propto k^{-7/4}$  [1]. Прямые каскады в системах гравитационных волн наблюдались неоднократно на поверхностях различных жидкостей [2–9]. Развитые обратные турбулентные каскады энергии в экспериментальных условиях до сих пор сформировать не удавалось. Однако недавно в системе волн на поверхности жидкого водорода наблюдали генерацию субгармоник на частотах ниже частоты накачки, что означает передачу энергии из области накачки в сторону больших масштабов (обратного потока) [10] в системе с дискретным спектром поверхностных колебаний.

Кроме волн на поверхности, и в объеме жидкости существуют вихревые течения, которые являются объектом изучения уже несколько столетий. В работах [11, 12] по изучению вихревого движения, генерируемого фарадеевскими волнами на поверхности воды, утверждается, что энергия вихревого течения из области накачки распространяется в сторону больших и малых масштабов – обратный и прямой каскады. Обратный энергетический каскад можно описать степенной функцией волнового вектора, близкой к  $k^{-5/3}$ , а прямой каскад – функцией  $k^{-3}$ . Такое распределение энергии характерно для двумерной турбулентности [13, 14].

Совсем недавно был предложен новый механизм генерации вихрей нелинейными волнами на поверхности вязкой жидкости [15, 16]. Результатом взаи-

<sup>1)</sup>e-mail: levch@issp.ac.ru

модействия двух нелинейных взаимно перпендикулярных волн с одинаковой частотой является формирование квадратной решетки из вихревых движений декорирующих частиц с периодом, равным длине волны возбуждения, обусловленных суммой двух механизмов: механизмом генерации завихренности нелинейными волнами и стоковым увлечением частиц [16–18].

В наших экспериментах жидкость является глубокой, так как для волн частотой 3 Гц и выше выполняется условие  $\lambda \ll 2\pi L$ , где  $\lambda$  – длина волны,  $L$  – глубина воды в ванне. Продолжительность накачки превосходит время вязкого затухания волны частотой 3 Гц. Вихри проникают в объем воды. Поэтому в наших экспериментах вихревое течение является трехмерным и должен наблюдаться прямой поток энергии вихревого течения из области больших масштабов в малые.

В работе [19] было показано, что в формировании вихревого движения волнами, возбуждаемыми в сосуде конечных размеров на частоте 6 Гц существенную роль играют субгармоники и гармоники волны накачки на частотах от 3 до 18 Гц, которые генерируются в результате нелинейного взаимодействия. Однако осталось не ясным, как формируются вихри максимального масштаба, дающие начало энергетического каскада.

Сформировать в лабораторных условиях развитые волновые обратные каскады практически невозможно. Однако для экспериментального изучения взаимодействия волновых каскадов и вихревого движения на поверхности жидкости можно искусственно создавать каскады энергии, применяя накачки с различными спектральными характеристиками и амплитудами. Нелинейную генерацию нескольких субгармоник и гармоник можно смоделировать, подав на волнопродукторы синтезированный сигнал, содержащий необходимые моды.

Целью настоящих экспериментов являлось выяснение механизма формирования крупномасштабных вихрей нелинейными волнами и особенностей установления потока вихревой энергии. Для этого были выполнены эксперименты по генерации вихревого движения смоделированными каскадами гравитационных волн, одновременно возбуждаемыми на поверхности воды на частотах от 3 до 6 Гц при различных амплитудах гармоник и разности фаз между электрическими сигналами, подаваемыми на волнопродукторы.

Напомним, что если на поверхности жидкости сформировались стоячие волны частотой  $\omega$  в двух взаимно перпендикулярных направлениях, то завих-

ренность решетки, образованной вследствие нелинейного взаимодействия волн

$$\Omega(\text{rot } V)_z, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость частицы, вычисляемая по трекам частиц на поверхности, зависит от амплитуд волн  $H_1, H_2$ , волнового числа  $k$ , разности фаз между волнами  $\psi$  и описывается выражением [16, 18]:

$$\Omega = -(1 + \sqrt{2}) \sin \psi H_1 H_2 \omega k^2 \sin(kx) \sin(ky). \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что завихренность является суммой двух членов. Первый член обусловлен стоковым увлечением [17], а за второй ответственно нелинейное взаимодействие волн [16].

**Экспериментальная методика.** Эксперименты с гравитационными волнами проводили в ванне размерами  $70 \times 70 \times 25$  см, изготовленной из стекла толщиной 10 мм. В ванну наливали дистиллированную воду. Глубина воды составляла 10 см. На рис. 1 показана схема установки. Ванна установле-

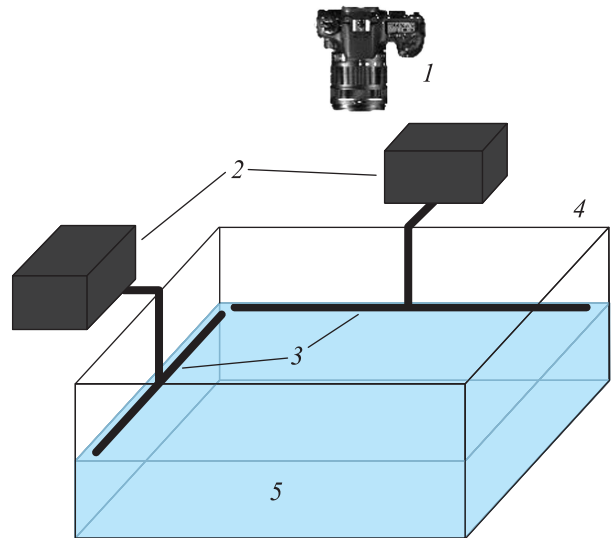


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема экспериментальной установки: 1 – фотоаппарат, 2 – приводы плунжеров, 3 – плунжеры, 4 – ванна, 5 – вода

на на виброизолирующем столе Standa с пневматической подвеской. Волны на поверхности воды возбуждали двумя волнопродукторами, состоящими из плунжера и привода, которые монтируются на рамную конструкцию и устанавливаются на сторонах стола. Плунжеры изготовлены из стержня нержавеющей стали диаметром 10 мм и длиной 68 см. В эксперименте стержни погружены в воду наполовину. В качестве привода волнопродукторов применяются савбуферы TS-W254R фирмы Pioneer номинальной

мощностью 250 Вт. Синтезированные компьютером электрические сигналы усиливаются и подаются на сабвуферы.

Для визуализации движения жидкости на поверхность воды насыпается порошок полиамида белого цвета со средним диаметром гранул около 30 мкм. Плотность частиц близка к плотности воды, поэтому на поверхности они находятся в погруженном состоянии, т.е. частицы полностью увлекаются потоками жидкости в вязком подслое. Частички на поверхности подсвечиваются светодиодами, расположенными по периметру ванны. Запись колеблющейся поверхности производится фотоаппаратом Canon EOS 70D с частотой 24 кадра в секунду. Такая частота съемки позволяет выбрать снимки колеблющейся поверхности, находящейся в одной фазе волны и исключить из дальнейшей обработки осциллирующую составляющую перемещения пробной частицы, плавающей на поверхности. Снимки затем суммируются для выявления треков движения частиц на поверхности. Обработка полученных изображений программой PIVLab [20] позволяет вычислить скорости движения частиц  $V_x$  и  $V_y$ , а затем рассчитать завихренность на поверхности по формуле (1) и распределение кинетической энергии по поверхности

$$E(x, y) = \frac{1}{2} \cdot \rho(V_x^2 + V_y^2). \quad (3)$$

Одномерное распределение энергии по волновому вектору  $E(k)$  вычисляется усреднением по кольцу в  $k$ -пространстве по формуле

$$E(k) = \frac{1}{2S\Delta k} \int \frac{d^2q}{(2\pi)^2} [|V_k|^2], \quad (4)$$

где интегрирование производится по кольцу  $k < q < k + \Delta k$ . Полученное значение нормируется на площадь поверхности жидкости  $S$ .  $V_k$  – фурье-компонента скорости частицы.

Амплитуда волн на поверхности воды рассчитывалась по измеряемой скорости колебаний частиц в волновом поле по методике, описанной в работе [19]. Крутизна возбуждаемых волн  $k \cdot H$  не превосходила 0.1 рад.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** В экспериментах изучалось формирование вихревого течения при генерации на поверхности воды следующих волновых комбинаций: на один из плунжеров подавалось переменное напряжение частотой 3 Гц, а на другой – 6 Гц; на оба плунжера подавались напряжения суммы переменных напряжений частотой 3 и 6 Гц; на плунжеры подавались сигналы, возбуждающие на поверхности одновременно четыре

волны частотой 3, 4, 5 и 6 Гц, разность фаз сигналов, подаваемых на плунжеры, составляет  $90^\circ$ . Напомним, что волновой вектор гармоники частотой 6 Гц равен  $1.3 \text{ см}^{-1}$  (длина волны  $\lambda = 4.8 \text{ см}$ ), 5 Гц равен  $0.9 \text{ см}^{-1}$  ( $\lambda = 7 \text{ см}$ ), 4 Гц равен  $0.6 \text{ см}^{-1}$  ( $\lambda = 10.5 \text{ см}$ ), а 3 Гц –  $0.36 \text{ см}^{-1}$  ( $\lambda = 17.5 \text{ см}$ ).

На рисунке 2а показаны треки полиамидных частиц, усредненные по кадрам, снятым в течение 2 с после возбуждения волн на поверхности двумя плунжерами с частотами колебаний 3 и 6 Гц в течение 1 ч. Крутизна волн  $k \cdot H$  равна 0.025 рад и 0.053 рад соответственно. Распределение полной энергии вихревого и волнового движений в пространстве волновых векторов, рассчитанное как фурье-преобразование, показано на рис. 2б. На рисунке 2с представлено распределение энергии только вихревого движения в векторном пространстве  $E(k_x, k_y)$ . Одномерное распределение полной энергии вихревого и волнового движений по волновым векторам, рассчитанное по формуле (4), показано на рис. 2д кривой I. Кривой II приведено одномерное распределение энергии в системе вихрей на поверхности воды. Хорошо видно, что энергия вихревого движения в максимуме в среднем почти на два порядка меньше максимума энергии волнового движения. Прямая линия на рис. 2д соответствует зависимости, пропорциональной  $k^{-5/3}$ . Прекрасно видно, что максимумы энергии вихревого движения не совпадают с максимумами волнового движения на частотах 3 и 6 Гц. Пики на распределении полной энергии волнового и вихревого движений по волновым векторам (1 и 2 на кривой I) находятся на значениях  $0.36$  и  $1.3 \text{ см}^{-1}$ , а максимумы энергии вихревого движения (1' и 2' кривой II) расположены на волновых векторах  $0.2$  и  $1.0 \text{ см}^{-1}$ . Отношения значений волновых векторов, на которых расположены пики распределения I к значениям волновых векторов пиков распределения II, составляют приблизительно 1.1 и 1.6. Примечательно, что волны, возбуждаемые на поверхности, генерируют соленоидальное движение жидкости на волновых векторах меньше, чем волновые вектора накачки. Обычно [21] при генерации завихренности двумя перпендикулярными волнами одной частоты пик на одномерном распределении  $E(k)$  находится на волновом векторе, превышающем волновой вектор накачки в  $\sqrt{2}$  раз. Это следует из формулы (4).

Четыре пика на рис. 2с, расположенные на вершинах прямоугольника  $(\pm 0.45, \pm 0.9) \text{ см}^{-1}$ , свидетельствуют о формировании на поверхности решетки вихрей. Чтобы понять причину формирования этих пиков в распределении  $E(k)$ , обратимся к рис. 2б, на котором хорошо видно, что на поверхности воды уста-

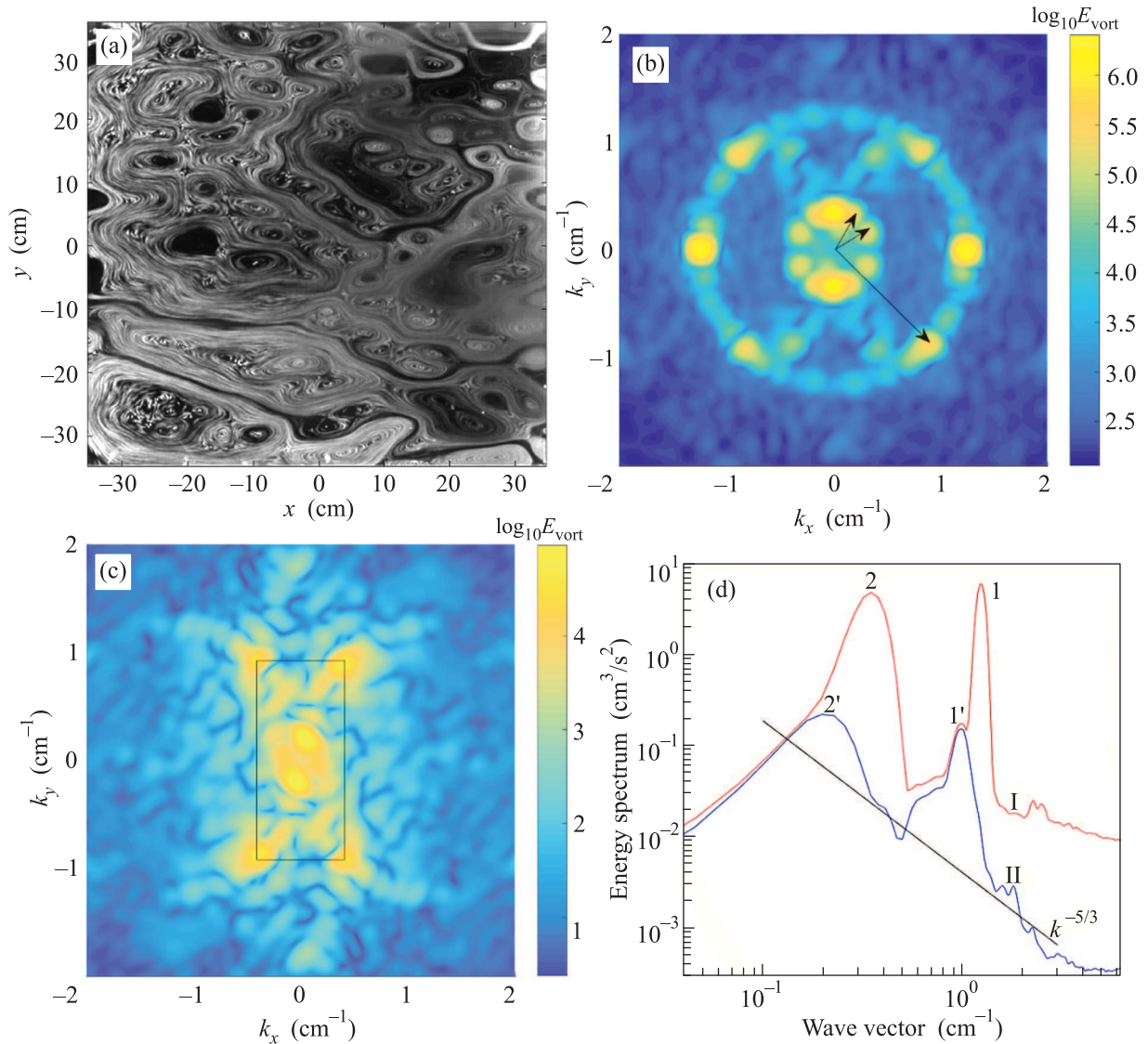


Рис. 2. (Цветной онлайн) (a)– Треки полиамидных частиц после возбуждения поверхности воды двумя перпендикулярными плунжерами частотами 3 и 6 Гц в течение 1 ч. (b) – Распределение полной энергии волнового и вихревого движений в  $k$ -пространстве. (c) – Распределение энергии вихревого движения в  $k$ -пространстве. (d) – Одномерное распределение энергии по волновому вектору: кривая  $I$  – полная энергия вихревого и волнового движений; кривая  $II$  – энергия вихревого движения. Крутизна волн  $k \cdot H$  с частотами 3 и 6 Гц равна 0.025 и 0.053 рад соответственно. Радиус-векторы на рис. 2b в первом квадранте проведены под углами  $30^\circ$  и  $60^\circ$  к оси  $Y$ , радиус-вектор в четвертом квадранте образует угол  $45^\circ$  с осью  $X$

новились стоячая волна вдоль направления  $X$ . Кроме того, прекрасно видны пики на  $(\pm 0.9, \pm 0.9) \text{ см}^{-1}$ , что свидетельствует о формировании на поверхности стоячих волн частотой 6 Гц, расположенных под углом  $90^\circ$  друг к другу, а также под углом  $\pm 45^\circ$  к направлению  $X$ , но имеющих амплитуду меньше, чем амплитуда основной генерируемой моды. Эти три волны на поверхности воды генерируют вихревую решетку в форме ромба со стороной, равной  $\sqrt{2}\lambda/2$ , и с острым углом между сторонами равным  $45^\circ$ ,  $\lambda$  –

длина волны, равная 4.8 см. Поэтому в обратном пространстве энергия сосредоточена в вершинах прямоугольника со сторонами  $\approx 0.9 \text{ см}^{-1}$  и  $\approx 0.45 \text{ см}^{-1}$ , который хорошо наблюдается на рис. 2с.

На рисунке 2b видно, что стоячая волна частотой 3 Гц устанавливается в направлении  $Y$ , и еще две волны расположены к ней под углами  $\approx 30^\circ$  и  $\approx 60^\circ$ . Эти три волны формируют на поверхности воды вихревую решетку, элементарная ячейка которой имеет форму ромба с углом в основании, равным  $30^\circ$ , и с

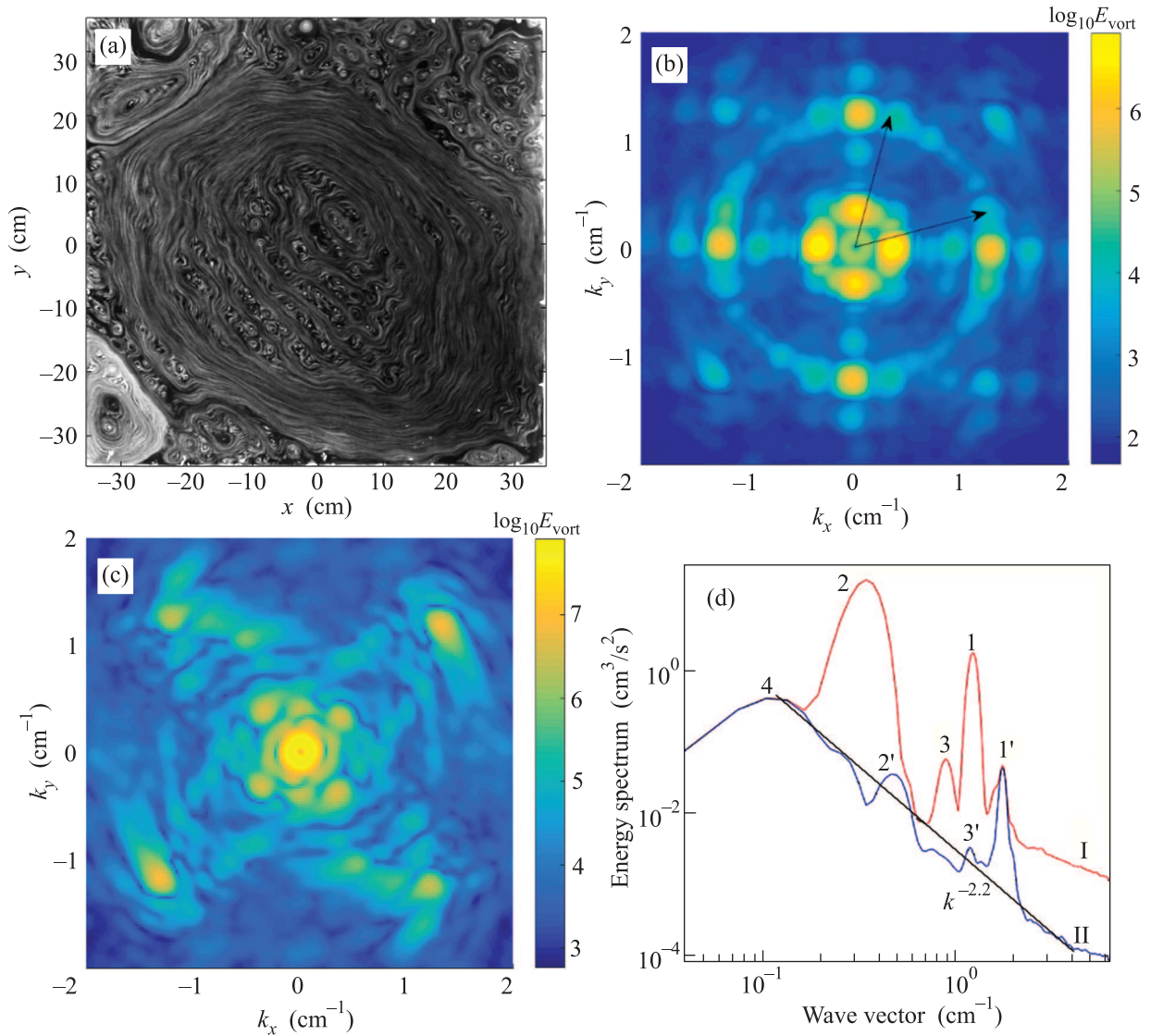


Рис. 3. (Цветной онлайн) (a) – Треки полиамидных частиц. (b) – Распределение полной энергии вихревого и волнового движений в  $k$ -пространстве. (c) – Распределение вихревой энергии в  $k$ -пространстве. (d) – Одномерное распределение энергии по волновым векторам: кривая I – полная энергия вихревого и волнового движений; кривая II – энергия вихревого движения. Накачка суммой частот 3 и 6 Гц. Крутизна волн  $k \cdot H$  равна 0.034 и 0.031 рад соответственно. Радиус-векторы на рис. 3b проведены под углами  $15^\circ$  к координатным осям

длинами прилегающих сторон, равными  $\lambda/2 \sin 30^\circ$ . Как видно, возникшая вихревая структура состоит из четырех вихрей, расположенных в вершинах ромба со сторонами длиной около 17.5 см, и с диагональю около 31 см, т.е. больше длины волны накачки.

Естественно, что волны, распространяющиеся под углом к волнам, идущим от плунжеров (основная мода), также должны формировать вихревую решетку, но согласно формуле (2), завихренность в узлах этой решетки мала по сравнению с завихренностью в узлах решетки, в формировании которой принимает участие основная возбуждаемая мода.

Рисунок 2d демонстрирует, что пики в одномерном распределении энергии вихрей по волновому вектору сформированы волнами основных мод и волнами, составляющими с ними угол  $45^\circ$  и  $30^\circ$ . Заметим также, что масштабы энергии волновых движений на частотах накачки 3 и 6 Гц и соответствующие им масштабы вихревых движений четко разнесены в  $k$ -пространстве.

Моделирование волнового каскада предполагает возбуждение поверхности перпендикулярными плунжерами, на приводы которых подаются сигналы, содержащие гармоники мод, формирующих турбулент-



ный волновой каскад. На рисунке 3а показаны треки полиамидных частиц, распределение полной энергии вихревого и волнового движений в пространстве волновых векторов, рассчитанное по формуле (4) – рис. 3б, распределение энергии вихревого движения в пространстве волновых векторов – рис. 3с. Одномерное распределение полной энергии вихревого и волнового движений (кривая  $I$ ) и вихревого движения (кривая  $II$ ) по волновому вектору представлено на рис. 3д. Все распределения сформировались к 466 с после включения накачки. Накачка производилась сигналами, содержащими суммы двух частот 3 и 6 Гц, подаваемыми на перпендикулярно расположенные плунжеры. Разность фаз электрических сигналов, подаваемых на разные плунжеры, составляла  $90^\circ$ . На рисунке 3а видно, что на поверхности сформировался большой вихрь наряду с небольшими смазывающими вихрями. На рисунке 3б прекрасно наблюдаются мощные пики энергии, соответствующие сумме волнового движения на частотах 3 и 6 Гц и вихревого движения. Отметим, что на рис. 3с хорошо видны пики двух решеток вихрей с периодами, равными длинам волн на частотах накачки 3 и 6 Гц. Мощный пик на малых векторах соответствует центральному большому вихрю, хорошо видимому на рис. 3а. На одномерном распределении энергий (рис. 3д кривая  $I$ ), хорошо видны пики 1 и 2 на волновых векторах, равных  $1.3$  и  $0.36 \text{ см}^{-1}$ , сформированные волнами накачки. Виден также пик 3, сформированный волной с волновым вектором, близким к  $0.9 \text{ см}^{-1}$ , частотой около 5 Гц. На распределении энергии вихревого движения (рис. 3д, кривая  $II$ ) присутствуют пики  $1'$ ,  $2'$  и  $3'$ , обусловленные наличием трех вихревых решеток, сформированных перпендикулярными волнами частотой 3, 5 и 6 Гц, и мощный пик 4 на  $k \approx 0.15 \text{ см}^{-1}$ . Распределение энергии вихревого движения  $E(k)$  в интервале волновых векторов, занимающих декаду от  $0.1$  до  $1 \text{ см}^{-1}$ , в среднем можно описать степенной функцией, пропорциональной  $k^{-2.2}$ . Прямая линия на рис. 3 соответствует зависимости, пропорциональной  $k^{-2.2}$ . Отметим, что сформировавшаяся картина треков декорирующих частиц (рис. 3а), а также распределение вихревой энергии по волновым векторам (рис. 3д) качественно совпадает с распределением, полученным нами при накачке поверхности воды волнами частотой 6 Гц, когда на поверхности в силу нелинейного взаимодействия волн возникла волна частотой 3 Гц [19]. На рисунке 3с хорошо видно, что квадратная решетка вихрей, сформированная взаимодействием волн частотой 3 Гц, деформирована крупномасштабным вихрем. Можно утверждать, что нам удалось экспери-

ментально смоделировать формирование вихревого движения перпендикулярными нелинейными волнами частотой 6 Гц, генерирующими низкочастотную субгармонику частотой 3 Гц в силу четырехволнового взаимодействия по схеме:

$$6 \text{ Гц} + 6 \text{ Гц} \rightarrow 3 \text{ Гц} + 9 \text{ Гц}.$$

Кроме этого, в нашем эксперименте в системе нелинейных волн, по-видимому, происходит еще один процесс, приводящий к генерации волны частотой 5 и 7 Гц. Возможная схема этого четырехволнового взаимодействия выглядит как:

$$6 \text{ Гц} + 6 \text{ Гц} \rightarrow 5 \text{ Гц} + 7 \text{ Гц}.$$

Пики на волновых векторах, равных  $\approx 0.9$  и  $1.7 \text{ см}^{-1}$ , соответствующие волнам частотой 5 и 7 Гц, видны на рис. 3б, d.

Вблизи пиков, за которые ответственны волны частотой 6 Гц, отчетливо видны пики энергии, соответствующие волнам, распространяющимся под углом  $\approx 15^\circ$  к основной моде. Эти волны, взаимодействуя с основной модой, могут формировать на поверхности вихревую решетку в форме ромба с углом в основании, равным  $15^\circ$ , и со сторонами, равными  $\approx 4.8/(2 \sin 15^\circ) = 9.2 \text{ см}$ . Большая диагональ ромба равняется 18 см. В векторном пространстве такая решетка даст два пика со значением волнового числа, равного  $0.35 \text{ см}^{-1}$ .

Пик 4 на волновом векторе  $0.15 \text{ см}^{-1}$  возник в результате нелинейного взаимодействия волн частотой 3 Гц с волновым вектором, направленным под углом около  $30^\circ$  к волновому вектору основной моды, так же, как и пик  $2'$  при накачке плунжерами на частотах 3 и 6 Гц (рис. 2б). Энергия из волновой системы передается в максимальный масштаб вихревого течения, откуда устанавливается поток энергии в малые масштабы (большие  $k$ ).

На рисунке 4 представлены распределения, сформировавшиеся после накачки в течение 1 ч суммой волн частотами 3, 4, 5 и 6 Гц, составляющими волновой каскад. Электрические сигналы со сдвигом фаз, равным  $90^\circ$ , подавались на волноприводы. Крутизна волн частотой 3, 4, 5 и 6 Гц составляла 0.027, 0.016, 0.011 и 0.006 рад соответственно. На рисунке 4а представлены треки полиамидных частиц, полученные усреднением 196 последовательных кадров через 1 ч после включения накачки. Видно, что на поверхности воды сформировался большой вихрь диаметром, равным длине стороны ванны. Внутри большого вихря можно выделить несколько вихрей меньшего размера. Около стенок ванны расположились

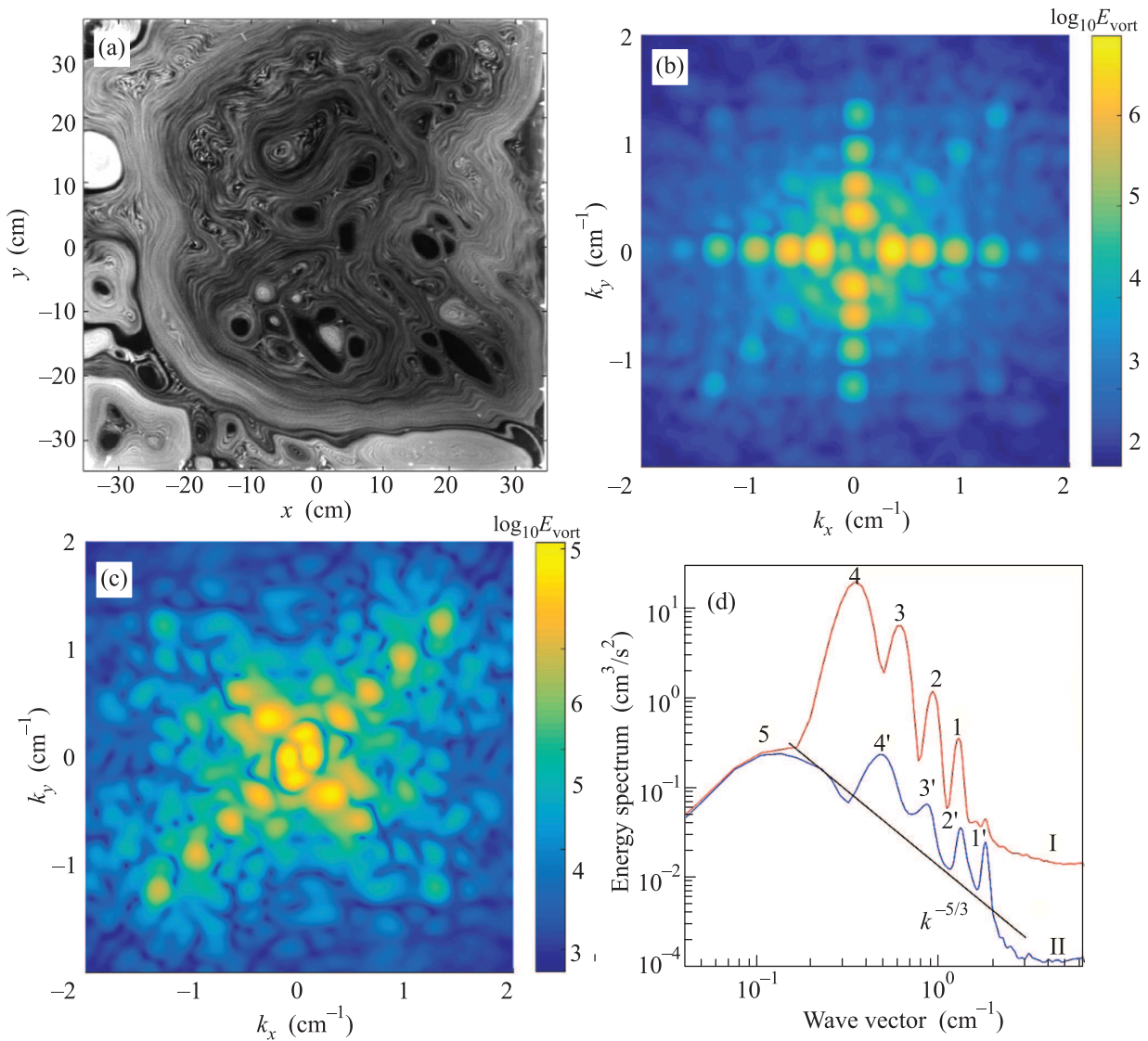


Рис. 4. (Цветной онлайн) (а) – Треки полиамидных частиц. (б) – Распределение суммы энергий вихревого и волнового движений в  $k$ -пространстве. (с) – Распределение вихревой энергии в  $k$ -пространстве, одномерное распределение вихревой энергии по волновому числу. Накачка в течение 1 ч на частотах 3, 4, 5, 6 Гц. Крутизна волн  $k \cdot H$  равна 0.027, 0.016, 0.011 и 0.006 рад соответственно. Прямая линия, пропорциональная  $k^{-5/3}$ , проведена через вершины пиков 1'–4' и смещена вниз для наглядности

небольшие смазывающие вихри. На распределении полной энергии по волновому вектору (рис. 4б) можно видеть пики, за которые ответственны волны частотами накачки. Примечательно, что на распределении  $E(k)$  видны пики, которые расположены вне перпендикулярных осей, вдоль которых находятся пики основных мод накачки. Это означает, что кроме основных мод, перпендикулярных плунжерам, которые формируют самые мощные пики, на поверхности воды распространяются волны с волновыми векторами, направленными под разными углами к стенкам ванны.

На распределении вихревой энергии по волновым векторам (рис. 4с), как и на распределении, представленном на рис. 3с, можно отметить наличие энергии на всех значениях волновых чисел в интервале от 0 до 2 см $^{-1}$ . Хорошо видны пики, соответствующие решеткам вихрей, сформированными перпендикулярными волнами частотой от 3 до 6 Гц.

Одномерное распределение энергии поверхностных колебаний по волновым векторам приведено на рис. 4д. Распределение энергии волн по волновым векторам, оцененное по наклону кривой, проведенной через четыре максимума 1–4 полной энергии,

близко к  $k^{-3.5}$ . В то время как одномерное распределение энергии вихревого движения по волновым векторам, оцененное по наклону прямой, проведенной через вершины пиков 1'–4', близко к  $k^{-5/3}$ . Значения волновых векторов пиков 1–4 в  $\sqrt{2}$  раз меньше значений волновых векторов пиков 1'–4'. Это свидетельствует о формировании волнами накачки частотами 3, 4, 5 и 6 Гц квадратных вихревых решеток с периодом, равным длине волны накачки. Решетки слабо деформируются большими вихрями, расположенными на  $k \approx 0.15 \text{ см}^{-1}$ , в силу большого значения их завихренности.

Причиной возникновения вихрей масштабом больше длины волны накачки и появление пика 5, как уже отмечалось выше, является взаимодействие волн частотой 3 Гц, с волновым вектором, составляющим не более  $30^\circ$  с волновым вектором основной трехгерцовой моды. На присутствие таких волн указывает сильное размытие четырех пиков, соответствующих волне частотой 3 Гц на рис. 4b.

Кроме основных гармоник накачки, на распределении полной энергии по волновому числу хорошо виден слабый пик на волновом векторе около  $1.7 \text{ см}^{-1}$ , аналогичный пику, заметному на распределении рис. 3d. За формирование этого пика ответственны волны частотой 7 Гц, возникшие в результате нелинейного взаимодействия основных мод из каскада. Однако значение энергии в этих волнах в  $\approx 10$  и более раз меньше, чем в волнах генерируемого каскада. Поэтому они не вносят существенного вклада в формирование вихревого движения. В системе поверхностных волн показатель степени в распределении энергии  $E(k) \sim k^{-n}$  изменяли от  $n = 2$  до  $n = 4$ . При этом распределение энергии по волновому вектору в вихревом движении оставалось неизменно близким к  $k^{-5/3}$ .

Таким образом, распределение энергии в вихревом движении не зависит от распределения энергии в каскаде волн, формирующих это движение, а определяется особенностями передачи энергии по вихревым каскадам. Энергия из системы волн передается в вихревое течение одновременно на нескольких масштабах. В результате взаимодействия волн с неколлинеарными волновыми векторами на поверхности формируются вихревые течения масштаба значительно больше длины волны накачки: энергия волн напрямую передается в крупномасштабные вихревые течения. Энергия вихревого течения из области малых векторов (больших масштабов) передается в сторону больших векторов – устанавливается прямой поток энергии.

Отметим, что в системе вихрей энергия может передаваться из области накачки в сторону малых волновых векторов в результате попарного слияния вихрей [19]. Однако более эффективным оказывается механизм передачи энергии из системы волн непосредственно в крупномасштабные вихри.

**Закключение.** Экспериментально было смоделировано и исследовано формирование вихревых течений на поверхности воды каскадами гравитационных волн с частотами от 3 до 6 Гц. Установлено, что при монохроматической накачке на поверхности возбуждается основная мода ячейки, а также волны, распространяющиеся под различными углами к волновому вектору основной моды. Наблюдалось возникновение гармоник с различными волновыми векторами за счет нелинейного взаимодействия волн. Было показано, что распределение энергии в вихревой системе формируется как на масштабе накачки волнами основных мод, так и на больших масштабах поверхностными волнами, распространяющимися под углом к основной моде. Спектр энергии вихревых течений на поверхности воды описывается степенной функцией, близкой к  $k^{-5/3}$ , и не зависит от распределения энергии в волновой системе. В крупномасштабные вихри энергия передается из системы поверхностных волн, основных мод накачки и возникших в результате нелинейного взаимодействия и распространяющихся под разными углами к основным модам. Энергия вихревого движения переносится из больших масштабов в малые в результате нелинейного взаимодействия вихрей.

Авторы благодарны А.В. Лохову за помощь в подготовке и проведении экспериментов, Л.П. Межову-Деглину, В.В. Лебедеву, Е.И. Кацу и И.В. Колоколову за полезные обсуждения. Методика эксперимента развита в рамках государственного задания Института физики твердого тела РАН, научные исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда # 17-12-01525.

1. С. В. Филатов, М. Ю. Бражников, А. А. Левченко, ПТЭ **1**, 107 (2014).
2. М. Ю. Бражников, Г. В. Колмаков, А. А. Левченко, ЖЭТФ **22**, 521 (2002).
3. С. В. Филатов, А. А. Левченко, М. Ю. Бражников, Л. П. Межов-Деглин, принята в печать в ПТЭ.
4. V. Zakharov, V. L'vov, and G. Falkovich, *Kolmogorov, Spectra of Turbulence I*, Springer, Berlin (1992), v. I.
5. E. Falcon, C. Laroche, and S. Fauve, Phys. Rev. Lett. **98**, 094503 (2007).
6. H. Xia, M. Shats, and H. Punzmann, Europhys. Lett. **91**, 14002 (2010).



7. C. Falcon, E. Falcon, and U. Bortolozzo, *Europhys. Lett.* **86**, 14002 (2009).
8. M.-T. Westra, *Patterns and Weak Turbulence in Surface Waves*, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven (2001).
9. Л. В. Абдурахимов, М. Ю. Бражников, А. А. Левченко, И. А. Ремизов, С. В. Филатов, *УФН* **182**, 879 (2012).
10. M. Yu. Brazhnikov, A. A. Levchenko, L. P. Mezhov-Deglin, and I. A. Remizov, *JETP Lett.* **100**, 669 (2015).
11. N. Francois, H. Xia, H. Punzmann, and M. Shats, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 194501 (2013)
12. N. Francois, H. Xia, H. Punzmann, S. Ramsden, and M. Shats, *Phys. Rev. X* **4**, 021021 (2014).
13. R. Kraichnan, *Phys. Fluids* **10**, 1417 (1967).
14. H. Xia and N. Francois, *Phys. Fluids* **29**, 111107 (2017).
15. С. В. Филатов, М. Ю. Бражников, А. А. Левченко, *Письма в ЖЭТФ* **102**, 486 (2015).
16. S. V. Filatov, V. M. Parfenyev, S. S. Vergeles, M. Yu. Brazhnikov, A. A. Levchenko, and V. V. Lebedev, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 054501 (2016).
17. O. N. Mesquita, S. Kane, and J. P. Gollub, *Phys. Rev. A* **45**(6), 3700 (1992).
18. V. M. Parfenyev and S. S. Vergeles, *Phys. Rev. Fluids* **3**, 064702 (2018).
19. С. В. Филатов, Д. А. Храмов, А. А. Левченко, *Письма в ЖЭТФ* **106**, 305 (2017).
20. W. Thielicke and E. J. Stamhuis, *J. Open Res. Software* **2**, 30 (2014).
21. С. В. Филатов, С. А. Алиев, А. А. Левченко, Д. А. Храмов, *Письма в ЖЭТФ* **104**, 714 (2016).