

Генерация осредненного течения полупогруженной осциллирующей сферой

А. И. Мизёв[†], Н. В. Панькова[‡]

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

[†]alex_mizev@icmm.ru

[‡]pankova.n@icmm.ru

В статье представлены результаты экспериментального исследования структуры осредненного течения, генерируемого полупогруженной в жидкость осциллирующей сферой. Источником осредненного движения в рассматриваемой ситуации являются (1) неоднородный вязкий пограничный слой на затопленной части сферы, генерирующий осесимметричное течение с ярко выраженной струей от нижнего полюса, и (2) бегущая поверхностная волна, увлекающая приповерхностный слой жидкости в направлении своего распространения. Основное внимание в статье уделено течению, создаваемому волновым механизмом, и изменению его структуры в зависимости от характеристик колебаний сферы и состояния границы раздела, связанного с наличием или отсутствием адсорбированного слоя поверхностно-активного вещества на поверхности. В ходе экспериментов исследовалась конфигурация волны и структура осредненного течения. Основная часть экспериментов проведена с изопропиловым спиртом, что исключало формирование адсорбированного слоя. Обнаружено, что бегущая цилиндрическая волна порождает на поверхности раздела осесимметричное центробежное течение, интенсивность которого увеличивается с ростом амплитуды колебаний. При достижении порогового значения амплитуды данный тип волны становится неустойчивым, в результате чего на поверхности возникает конфигурация в виде двух спиральных волн, распространяющихся во встречных азимутальных направлениях, частота которых в два раза меньше частоты колебаний сферы. Амплитуда волны, полученной в результате суперпозиции, оказывается промодулированной в азимутальном направлении, в результате чего скорость радиального течения также оказывается периодической функцией азимутальной координаты. Проведена серия качественных экспериментов с водой различной степени очистки для выяснения влияния адсорбированного слоя сурфактанта на структуру осредненного течения. Показано, что наличие сурфактанта приводит либо к полному обездвиживанию поверхности, либо формированию многовихревого течения в зависимости от содержания сурфактанта. В заключение проводится сравнение полученных результатов с данными, полученными в более ранних исследованиях рассматриваемой в статье задачи.

Ключевые слова: колебания; поверхностная волна; осредненное течение; поверхностно-активное вещество

Поступила в редакцию 20.06.2025; после рецензии 19.08.2025; принята к опубликованию 19.08.2025

Generation of an average flow by a semi-submerged oscillating sphere

A. I. Mizev[†], N. V. Pan'kova[‡]

Institute of Continuous Media Mechanics, Perm, Russia

[†]alex_mizev@icmm.ru

[‡]pankova.n@icmm.ru

The paper presents the results of an experimental study into the structure of an average flow generated by a semi-immersed oscillating sphere. The average flow in the considered situation is induced by (1) an inhomogeneous viscous boundary layer on the submerged part of the sphere, generating an axisymmetric flow with a pronounced jet from the lower pole of the sphere, and (2) a

traveling surface wave drifting the subsurface liquid layer in the direction of its propagation. The paper is mainly focused on the flow induced by the wave mechanism and on the change in its structure depending on the characteristics of the vibrations and the state of the interface associated with the presence or absence of an adsorbed layer of a surfactant on the surface. The wave configuration and the structure of the average flow were investigated in experiments. The main part of the experiments was carried out with isopropyl alcohol, which excluded the formation of an adsorbed layer. It has been found that a traveling cylindrical wave generates an axisymmetric centrifugal flow along the interface, the intensity of which grows with increasing amplitude of vibrations. When the amplitude exceeds a critical value, the cylindrical wave becomes unstable, which results in the formation of two spiral waves propagating in opposite azimuthal directions and having the frequency two times less than the oscillation frequency of the sphere. The amplitude of the resulting wave turns out to be modulated in the azimuthal direction, as a result of which the radial flow velocity also turns out to be a periodic function of the azimuthal coordinate. Additionally, a series of qualitative experiments with water of various purity degrees was carried out to determine the effect of the adsorbed surfactant layer on the structure of the average flow. It is shown that the presence of a surfactant leads either to complete immobilization of the surface or to the formation of a multi-vortex flow on the interface, depending on the surfactant content. In conclusion, the results obtained are compared with the data reported in earlier studies on the problem under consideration.

Keywords: oscillations; surface wave; average flow; surfactants

Received 20 June 2025; revised 19 August 2025; accepted 19 August 2025

doi: 10.17072/1994-3598-2025-3-22-33

1. Введение

Колебательное движение твердой границы относительно жидкой среды приводит к формированию периодического движения жидкости в пределах вязкого пограничного слоя в форме быстро затухающей сдвиговой вязкой волны. При наличии неоднородностей пограничного слоя, вызванных вариациями свойств жидкой среды, например, вязкости, или геометрическими особенностями твердой границы, в пределах пограничного слоя, кроме периодического движения, генерируется стационарное вихревое течение [1]. В силу вязких напряжений происходит передача импульса и во внешние слои жидкости, где развивается стационарное вторичное течение, обычно называемое в англоязычной литературе «steady streaming» [2]. Структура такого течения определяется геометрией задачи и параметрами периодического движения. Например, в случае поступательных колебаний сферического тела в неограниченной жидкой среде меридиональная неоднородность характеристик пограничного слоя приводит к генерации осредненного течения от экватора к полюсам, формирующего две струи, распространяющиеся от полюсов сферы вдоль оси осцилляций [3–8].

В настоящей статье рассматривается модификация этой известной задачи, когда сферическое тело, наполовину погруженное в жидкость, совершает поступательные вибрации в направлении, перпендикулярном поверхности жидкости. Данная задача интересна тем, что осредненное течение в такой постановке формируется сразу двумя независимыми механизмами (см. рис. 1). Первая составляющая течения генерируется описанным вы-

ше механизмом в вязком пограничном слое на погруженной части сферы и представляет собой осесимметричное течение с ярко выраженной струей от нижнего полюса и возвратным центростремительным движением. Вторая составляющая течения генерируется распространяющейся радиально от сферы поверхностной волной и представляет собой центробежное на поверхности осесимметричное течение. Такое течение возникает в силу двух различных причин. На первую из них указал еще Стокс в 1847 [9], который показал, что при распространении одномерной волны в идеальной жидкости, несмотря на нулевую среднюю скорость жидкости в любой точке пространства (эйлерова скорость), средняя по времени скорость любого элемента жидкости (лагранжева скорость) будет иметь ненулевую горизонтальную компоненту скорости на поверхности, так называемый дрейф Стокса. Позднее задача была рассмотрена Лонгем-Хиггинсом [10] с учетом вязкости, который показал возникновение вязкого пограничного слоя вблизи поверхности, что приводит к появлению среднего по времени вязкого касательного напряжения и, как следствие, среднего по времени течения жидкости. Оба обнаруженных механизма приводят, в конечном итоге, к развитию движения приповерхностного слоя жидкости в направлении движения волны.

Необходимо отметить, что задача о генерации поверхностных волн колеблющимися на границе раздела телами различной формы, сферической [11–12], цилиндрической [12–14] или в форме многогранников [15–19], и изучении структуры возникающих вследствие волнового движения приповерхностных течений была исследована ранее экспериментально многими исследователями.

Анализ публикаций по данной тематике показывает, что во всех без исключения случаях исследователями наблюдалось формирование вихревого течения на поверхности. В зависимости от формы колеблющегося тела, а также от амплитуды и частоты колебаний на поверхности возникала многовихревая структура течения той или иной конфигурации. И если в случае тела, не обладающего осевой симметрией и порождающего, соответственно, асимметричный фронт волны, генерация движения на поверхности с вертикальной составляющей завихренности возможна, то возбуждение такого течения осесимметричной волной от сферического тела сложно объяснить. Более того, в работе [11] при малых амплитудах колебаний сферы течение на поверхности вовсе отсутствовало, несмотря на наличие бегущей волны. В то же время, выводы теоретических исследований [10] предсказывают формирование течения на поверхности и в приповерхностном слое в направлении распространения волны и только с горизонтальной составляющей завихренности, параллельной поверхности раздела.

Причина указанных различий, по мнению авторов данной статьи, кроется в некорректной постановке экспериментов, связанной с выбором рабочей жидкости и использованием ряда экспериментальных методик. Во всех указанных выше работах в качестве рабочей жидкости была использована вода. В силу большого поверхностного натяжения воды, практически любая примесь будет выступать в роли поверхностно-активного вещества по отношению к границе раздела, формируя на ней адсорбированные слои. Полное устранение таких слоев на поверхности воды является крайне сложной и трудоемкой задачей. Остаточное содержание поверхностно-активного вещества, или сурфактанта, достаточное для формирования слоя в газовом фазовом состоянии, имеется даже при использовании воды второго типа, т.е. полученной в процессе деионизации и бидистилляции. Кроме того, источником сурфактanta может являться неправильный выбор материалов и неправильная процедура очистки элементов установки, контактирующих с водой. Анализ указанных выше публикаций указывает на использование исследователями дистилированной воды, и в статьях не содержится описания процедуры подготовки экспериментальной установки. Более того, содержится информация о целинаправленном добавлении тех или иных веществ, являющихся сильными сурфактантами, для контрастирования изображения формы волны, стабилизации визуализирующих частиц или даже «очистки поверхности воды». Все это указывает на непонимание исследователями роли сурфактантта в формировании течений в рамках физико-химической гидродинамики. В зависимости от характеристик течения в приповерхностной области и геометрии задачи присутствие слоя сурфактантта

может приводить к кардинальной смене как структуры течения в объеме, так и смене условий возникновения его неустойчивости [20]. В недавнем экспериментальном исследовании [21] было показано, что, в случае взаимодействия слоя сурфактана с чисто дивергентным течением, возможно существование механического равновесия слоя сурфактана, когда вязкие силы со стороны течения в объеме уравновешиваются градиентом поверхностного давления. В работе также введен

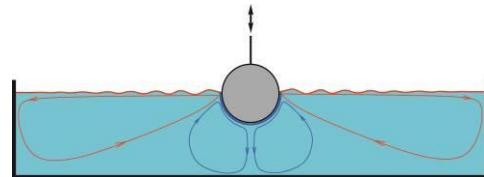


Рис. 1. Схема эксперимента и механизмов генерации осредненного течения в задаче

управляющий безразмерный параметр задачи, поверхностное число Рэлея, и показано, что при превышении данным параметром критического значения механическое равновесие нарушается с формированием многовихревого течения в пределах слоя сурфактана. Принимая во внимание использование воды и отсутствие необходимых подготовительных этапов, можно предположить, что именно такой тип неустойчивости адсорбированного слоя и наблюдался в указанных выше экспериментах. С этой точки зрения необходима постановка и проведение экспериментальных исследований с поверхностями раздела как заводом свободных от любых поверхностно-активных примесей, так и содержащих адсорбированные слои, с последующим проведением сравнительного анализа полученных результатов.

В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования структуры и устойчивости осредненного течения, генерируемого полупогруженной осциллирующей сферой, в зависимости от характеристик колебаний сферы и состояния границы раздела, связанного с наличием или отсутствием адсорбированного слоя поверхностно-активного вещества на поверхности.

2. Экспериментальная установка и методики измерений

Эксперименты проводились в стеклянной цилиндрической ѹювете (см. рис. 1) диаметром 19.1 см и высотой 6.0 см. йювета заполнена слоем изопропилового спирта глубиной 3.0 см. В центре поверхности жидкости расположена стеклянная сфера диаметром 3.0 см, наполовину погруженная в жидкость. Сфера совершает вертикальные колебания благодаря соединению через специальный шток с электромагнитным вибратором. Частота колебаний в экспериментах варьировалась в диапазоне 20–50 Гц с амплитудой до 0.8 мм. Сигнал синусоидальной формы подавался на вибратор с

генератора Г3-33 с контролем амплитуды сигнала вольтметром GDM-8246 (Good Will Instruments, Тайвань). Амплитуда колебаний сферы измерялась при помощи катетометра В-630 путем измерения вертикальной координаты специальной метки, прикрепленной на штоке. Во избежание попадания неконтролируемых примесей в используемую в экспериментах жидкость кювета и сфера проходили многоступенчатую процедуру очистки, включающую обработку поверхности хромпиком с последующим многократным ополаскиванием бидистиллированной водой. Сверху кювета была закрыта стеклянной пластиной, что позволяло избежать испарения жидкости и, как следствие, формирования нежелательных поверхностных течений термокапиллярной природы. Кювета, вибратор и часть оптической схемы были помещены в ветрозащитный стеклянный бокс, наличие которого также позволяло слаживать колебания температуры в лаборатории, сохраняя тем самым неизменными температурные условия эксперимента. Все эксперименты проводились при температуре жидкости и окружающего воздуха 23°C.

В ходе проведения эксперимента при фиксированной частоте и амплитуде колебаний сферы визуализировалась форма генерируемой на поверхности жидкости волны и структура, и определялись количественные характеристики возникающего течения. Для визуализации формы волны поверхность жидкости освещалась рассеянным светом, сформированным лампой дневного света и матовым стеклом. Наблюдения велись в отраженном свете камерой acA2000-165uc (Basler, Германия), частота съемки которой задавалась равной частоте волн. Для визуализации течения в жидкость были добавлены светорассеивающие частицы – посеребренные полые стеклянные сферы со средним размером 10 мкм (Dantec, Германия). Частицы предварительно сепарировались в спирте для достижения условия нейтральной плавучести. Наблюдения движения визуализирующих частиц производились в плоскости светового ножа, сформированного лазером KLM-532/h/1000 (ФТИ-Оptronik, Россия) с длиной волны 532 нм и линзой Паузлла (LGL130, Thorlabs), позволяющей сформировать световой нож с постоянной по углу интенсивностью излучения. В экспериментах световой нож позиционировался либо вертикально в диаметральной плоскости, либо горизонтально в плоскости поверхности жидкости. В последнем случае изображение частиц в световом ноже наблюдалось через зеркало, установленное под углом 45° к поверхности. Вследствие технических сложностей расположения элементов оптической системы наблюдения проводились на одной половине поверхности, что допустимо в рассматриваемом случае ввиду осевой симметрии задачи. Движение светорассеивающих частиц в плоскости светового ножа регистрировалось с помощью видеокамеры acA2000-165uc (Basler, Германия) с ча-

стотой захвата кадров, равной частоте колебаний сферы, что позволяло исключить из рассмотрения переменную составляющую скорости, связанную с колебаниями тела, и наблюдать структуру только осредненного течения, фиксируя на изображениях положения частиц в одну и ту же фазу колебаний. Полученное с камеры видеоизображение далее использовалось для построения трековых изображений, позволяющих качественно представить структуру течения, либо для количественного восстановления поля скорости. Для получения трековых изображений использовалось открытое программное обеспечение ImageJ. Для восстановления векторных полей скорости использовался PIV метод, реализованный в открытом программном обеспечении PIVlab, работающем в составе программного пакета MathLab.

Для выяснения влияния наличия адсорбированного слоя поверхностно-активного вещества были проведены две серии экспериментов: с поверхностью, заведомо свободной от поверхностно-активных веществ, и с поверхностью с их варьируемым содержанием. В первом случае в качестве исследуемой жидкости был использован изопропиловый спирт, низкое поверхностное натяжение которого исключает случайное содержание веществ, демонстрирующих поверхностно-активные свойства по отношению к поверхности раздела спирт-воздух. Во второй серии экспериментов была использована вода различной степени очистки: водопроводная вода, в которой всегда имеется достаточно большое содержание остаточных поверхностно-активных веществ, и бидистиллированная вода, содержание остаточных поверхностно-активных примесей в которой значительно меньше. Тип сурфактанта и его содержание на поверхности раздела не контролировалось, поскольку эксперименты с водой носили качественный характер с целью проведения сравнительного анализа структуры осредненного течения с результатами, полученными на границе раздела, заведомо не содержащего адсорбированного слоя.

3. Результаты экспериментов

3.1. Конфигурация волны и структура осредненного течения на чистой поверхности

Наблюдения за движением, возникающим в жидкости при осцилляциях полупогруженной сферы, показали наличие двух типов течения, которые генерируются в жидкости независимо двумя механизмами, указанными во Введении. На трековых фотографиях, сделанных в вертикальной диаметральной плоскости (см. рис. 2), хорошо видны два конвективных тороидальных вихря: под сферой в объеме жидкости и приповерхностный. Нижний вихрь генерируется шлихтинговским механизмом в вязком пограничном слое, прилегающем к погруженной в жидкость части сферы. Опусканье

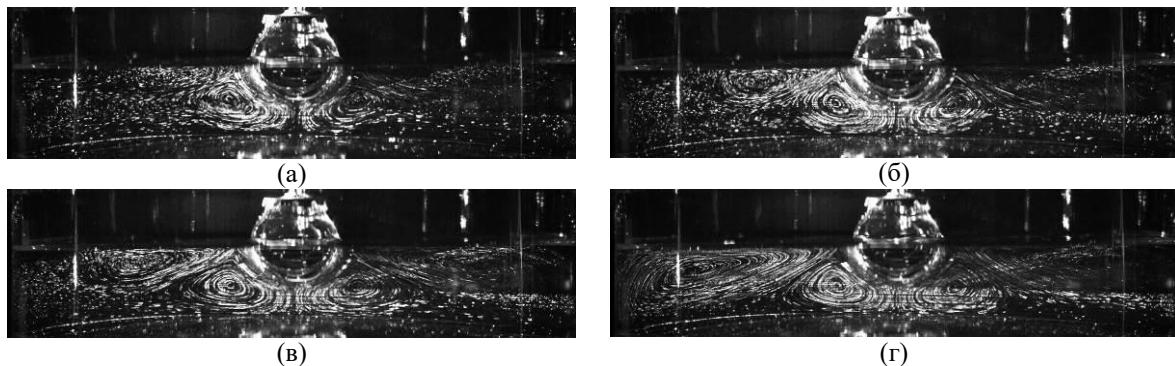


Рис. 2. Трековые изображения, иллюстрирующие структуру осредненного течения в вертикальной диаметральной плоскости, полученные при частоте колебаний сферы $\omega=20\text{ Гц}$ и различной амплитуде колебаний: (а) – 0.42 мм; (б) – 0.51 мм; (в) – 0.62 мм; (г) – 0.73 мм

движение жидкости в меридиональном направлении вдоль поверхности сферы приводит к формированию струи, распространяющейся вертикально вниз от нижнего полюса сферы к дну. Возвратное подъемное течение замыкает вихрь в менисковой зоне, т.е. у верхней границы вязкого погранслоя. В силу малой глубины слоя жидкости (порядка диаметра сферы) струя достигает дна уже при малых амплитудах колебаний (см. рис. 2, а), формируя тем самым конвективную ячейку, распространяющуюся на всю толщину жидкого слоя. Дальнейшее увеличение амплитуды практически не меняет размеры и форму ячейки (см. рис. 2, а–г), приводя лишь к изменению абсолютной скорости конвективного движения. На рис. 3 представлен график зависимости скорости жидкости, измеренной на оси симметрии струи на некотором расстоянии от нижнего полюса сферы. Видно, что интенсивность данного типа течения увеличивается с ростом амплитуды колебаний сферы при фиксированной частоте. При этом качественно структура течения в вихре не меняется, сохраняя осевую симметрию при любых режимах движения сферы. При анализе изображений на рис. 2 видна выпуклость дна, связанная с дефектом изготовления кюветы, которая, однако, не влияет на общую структуру течения в силу малости и симметрии дефекта.

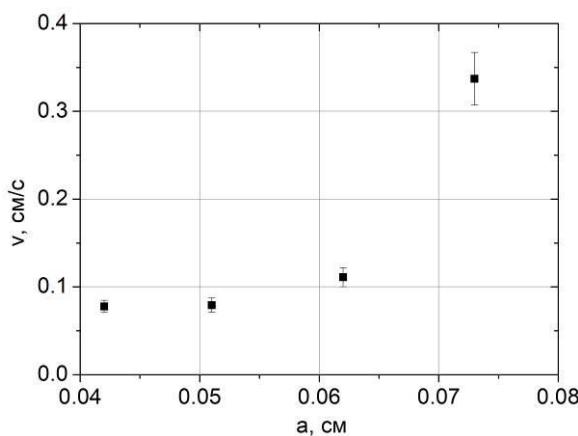


Рис. 3. Скорость осредненного течения, измеренная на оси симметрии струи на расстоянии 5 мм от нижнего полюса сферы, как функция амплитуды колебаний при $\omega=20\text{ Гц}$

Приповерхностный вихрь, генерируемый бегущей капиллярно-гравитационной волной, состоит из центробежного течения, направленного от сферы к периферии кюветы, и возвратного течения, замыкающего вихрь в менисковой зоне. Наблюдения в вертикальной диаметральной плоскости (см. рис. 2) показывают увеличение радиального размера вихря по мере увеличения амплитуды колебаний, который, на первый взгляд, остается осесимметричным.

Однако основные изменения в структуре течения, связанные, в том числе, и с нарушением осевой симметрии, становятся заметны только при наблюдении в горизонтальной плоскости. При небольших амплитудах колебаний на выбранной частоте на поверхности наблюдается бегущая цилиндрическая волна (см. рис. 4, а), амплитуда которой уменьшается в радиальном направлении как за счет вязких диссипаций, так и в силу геометрии задачи. Наличие бегущей волны приводит к генерации центробежного осесимметричного течения в приповерхностном слое (см. рис. 4, б, в), радиальный размер которого ограничен в пространстве при фиксированных характеристиках колебаний сферы, несмотря на то что волна, порождающая течение в приповерхностном слое, распространяется до внешних стенок кюветы. Такое поведение связано, скорее всего, с наличием порогового значения амплитуды волны, ниже которого волна не способна увлекать вязкую жидкость в движение. По мере роста амплитуды колебаний сферы и, следовательно, амплитуды волны наблюдается увеличение радиального размера как приповерхностного течения, так и всей конвективной ячейки. На рис. 5 представлена зависимость диаметрального размера приповерхностного течения от амплитуды колебаний сферы. В силу небольших вариаций диаметрального размера, обусловленных наличием слабого остаточного паразитного течения на периферии кюветы, что хорошо видно на поле скоростей (см. рис. 4, в), данный параметр измерялся для нескольких азимутальных срезов, по результатам чего находилось среднее значение и погрешность измерений. Из рис. 5 видно, что размер конвективной области

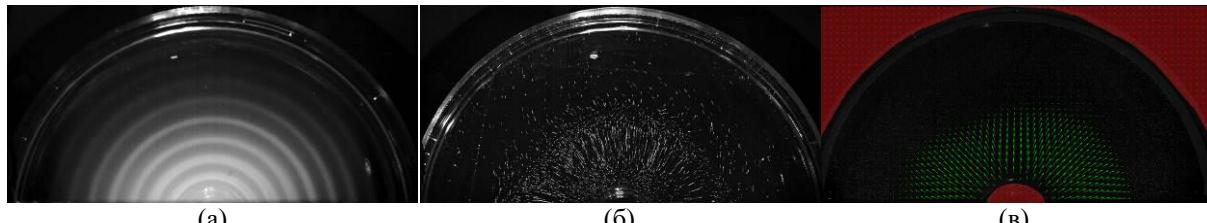


Рис. 4. Конфигурация волны на поверхности (а), структура осредненного течения (б) и поле скорости, полученные при частоте колебаний $\omega=20$ Гц и амплитуде 0.51 мм

линейно увеличивается с ростом амплитуды колебаний. При некоторой критической амплитуде колебаний сферы, величина которой зависит от частоты, наблюдается смена структуры капиллярно-гравитационной волны. Вместо бегущей цилиндрической волны на всей поверхности пороговым образом возникает пара спиральных волн, распространяющихся во встречных азимутальных направлениях (см. рис. 6, а). При этом частота возникающих волн в два раза меньше частоты колебаний сферы и исходной бегущей волны. В результате суперпозиции спиральных волн на границе раздела устанавливается волновая структура, изображенная на рис. 6, а. Видно, что сумма волновых векторов спиральных волн дает волновой вектор, направленный в каждой точке радиально, как и у исходной бегущей волны, но амплитуда волны, полученной в результате суперпозиции, оказывается промодулированной в азимутальном направлении: направления с большей и меньшей амплитудой волны периодически сменяют друг друга в азимутальном направлении. Фактически, пространственное перераспределение результирующей волновой структуры является следствием интерференции двух возникающих в результате неустойчивости спиральных волн.

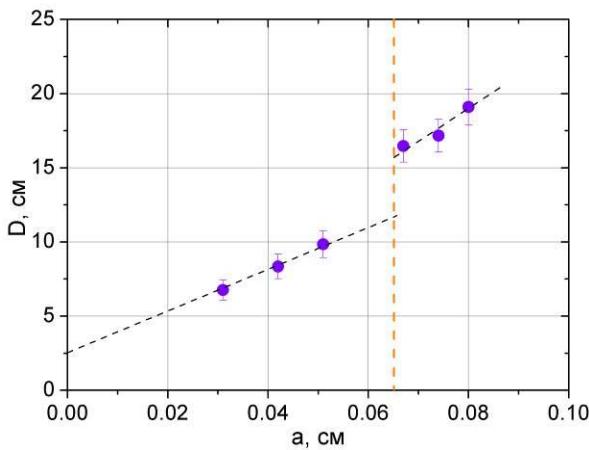


Рис. 5. Диаметр конвективной ячейки, генерируемой волновым механизмом, как функция амплитуды колебаний при $\omega=20$ Гц

Такая смена конфигурации поверхностной волны наблюдалась ранее неоднократно в экспериментальных исследованиях в относительно толстых слоях жидкости как для цилиндрической [12, 22–24], так и плоской волны [12–13, 25]. Объясне-

ние данному явлению было впервые дано в теоретическом исследовании Бенджамина и Фейра [26], а затем более строго Захаровым [27] на основе решения нелинейного уравнения Шредингера. Было показано, что смена конфигурации является следствием так называемой модуляционной неустойчивости бегущей волны, в результате которой возникают две волны, волновые вектора k_1 и k_2 и частоты ω_1 и ω_2 , которых связаны с параметрами бегущей волны следующим образом: $\omega_0 = \omega_1 + \omega_2$, $k_0 = k_1 + k_2$.

В работах [26, 28–29] было показано, что указанная неустойчивость бегущей волны становится возможной только при соблюдении условия $k_0 H > 1.363$, где H – глубина слоя жидкости. Таким образом, данное условие можно рассматривать как своего рода границу между приближениями «мелкой» и «глубокой» воды в рассматриваемой ситуации. Важное достижение Бенджамина и Фейра состояло в демонстрации того факта, что смена конфигурации волны является результатом гидродинамической неустойчивости, а не следствием, как думали до этого, несовершенства экспериментальной техники.

Как уже указывалось выше, смена конфигурации волны происходит пороговым образом при достижении критического значения амплитуды колебаний. На рис. 7 приведена зависимость критического значения амплитуды колебаний от частоты колебаний сферы. Видно, что с увеличением частоты пороговое значение амплитуды уменьшается. Таким образом, полученная кривая разделяет области параметров существования режимов бегущей волны и промодулированной волны, полученной суперпозицией двух спиральных волн.

Смена конфигурации волны существенным образом сказывается на структуре конвективного течения в приповерхностной области. Во-первых, это приводит к скачкообразному увеличению горизонтального размера конвективной ячейки, что хорошо видно из рис. 5. Во-вторых, течение перестает быть азимутально однородным. На рис. 6, б, в приведено трековое изображение и двумерное поле скорости, полученное PIV методом, соответствующие конфигурации волны, приведенной на рис. 6, а. Видно, что при сохранении радиального направления течения жидкости в пределах конвективной ячейки сама величина скорости промоду-

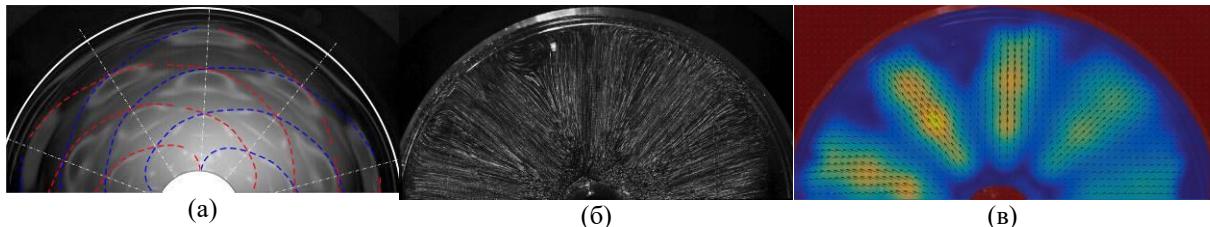


Рис. 6. Конфигурация волны на поверхности (а), структура осредненного течения (б) и двумерное поле скорости на поверхности при частоте колебаний $\omega=20$ Гц и амплитуде 0.77 мм

лирована вдоль азимутальной координаты: направления с большей и меньшей скоростью радиального течения периодически сменяют друг друга в азимутальном направлении. Скорость конвективного течения в пределах этих направлений отличается примерно в два раза (см. рис. 8). В результате промодулированным оказывается и диаметральный размер приповерхностного течения. В этом случае размер ячейки, представленный на рис. 5, определялся как среднее от максимального и минимального значений диаметра. Сравнительный анализ изображений формы волны (см. рис. 6, а) и структуры течения (см. рис. 6, б) показывает, что направления с максимальной скоростью течения в конвективной ячейке совпадают с направлением, в котором амплитуда волны максимальна. И наоборот, направления с минимальной скоростью течения совпадают с азимутальным расположением минимумов амплитуды волны. Таким образом, так же, как и в случае бегущей волны, интенсивность поверхностного течения определяется амплитудой волнового движения, полученною, в данном случае, в результате суперпозиции двух спиральных волн.

3.2. Осредненное течение на поверхности с адсорбированным слоем

Представленные выше результаты исследования структуры течения, генерируемого волновым механизмом, различно отличаются от имеющихся в литературе, где наблюдалась многовихревая

структуря течения на поверхности как в режиме бегущей, так и промодулированной волны [11–12, 15]. В работе [11] сообщалось об отсутствии течения на поверхности в режиме бегущей волны и развитии поверхностного течения только при переходе в режим промодулированной волны. Как уже было указано во Введении, основным отличием в постановке экспериментальных исследований, представленных в настоящей статье, является использование изопропилового спирта, а не воды, как во всех перечисленных выше работах. Это позволило исключить формирование слоя сурфактанта на границе раздела жидкость–воздух и впервые исследовать структуру течения, генерируемого волновым механизмом на свободной поверхности.

Полученные результаты можно разделить на две группы, соответствующие двум различным конфигурациям волнового движения на границе раздела и различной структуре возникающего течения. Рассмотрим полученные в этих двух случаях результаты на предмет возможного взаимодействия течения с пленкой сурфактанта при ее наличии на поверхности. В случае бегущей волны движение жидкости в тонком приповерхностном слое имеет чисто дивергентную структуру, в которой отсутствует вертикальная составляющая вихревого течения. Как было показано в работе [21], такая структура течения предполагает возможность возникновения механического равновесия в слое сурфактанта, когда вязкие силы со стороны объемного течения уравновешиваются в каждой

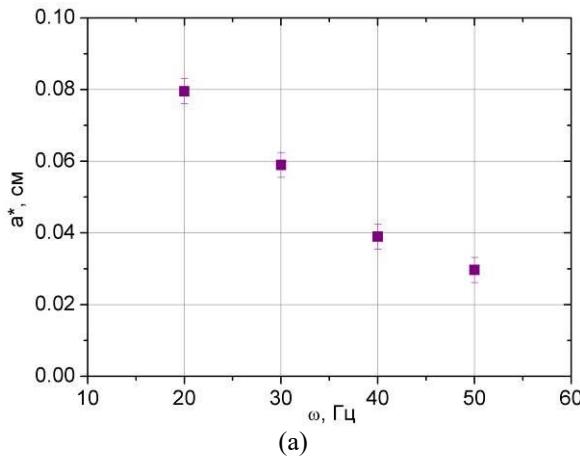


Рис. 7. Критическая амплитуда колебаний сферы, при которой наблюдается неустойчивость круговой волны, как функция частоты колебаний

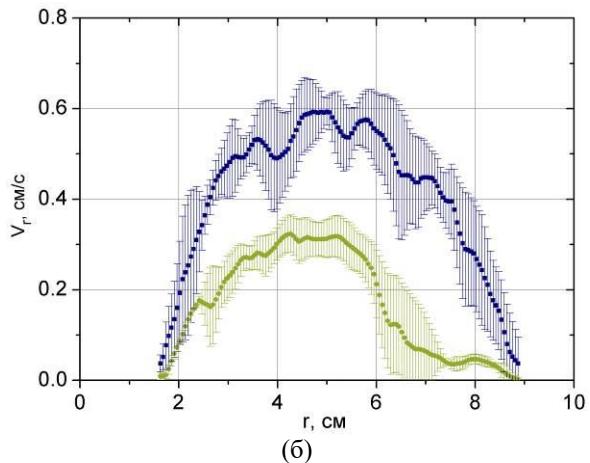


Рис. 8. Профиль радиальной скорости течения на поверхности от радиальной координаты. Разными кривыми соответствуют азимутальные направления с максимальной (квадраты) и минимальной (круги) амплитудой волны

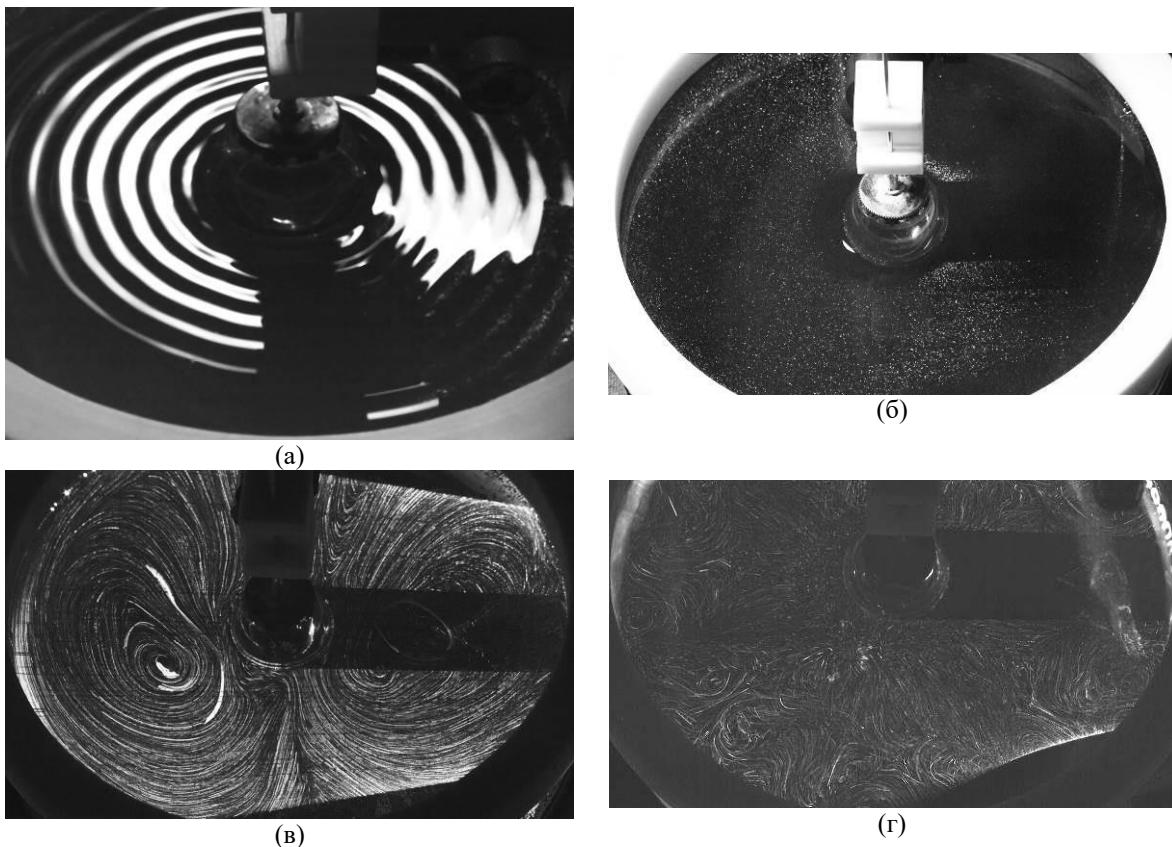


Рис. 9. Конфигурация волны при амплитуде колебаний сферы 0.04 мм (а) и структура осредненного течения на поверхности водопроводной воды при амплитуде колебаний сферы 0.04 мм (б) и 0.10 мм (в), и на поверхности бидистиллированной воды при амплитуде колебаний 0.10 мм (г). Частота колебаний сферы $\omega=40$ Гц

точке слоя градиентом поверхностного давления со стороны сжатого течением слоя сурфактанта. Поверхность в этом случае остается неподвижной. В этой же работе было показано, что увеличение интенсивности течения вблизи поверхности может приводить к одному из двух возможных вариантов развития событий в зависимости от величины двух управляющих параметров задачи. Первый из них, параметр упругости, имеет смысл отношения касательных напряжений на поверхности, обусловленных градиентом поверхностного давления и вязкими напряжениями. Второй из безразмерных параметров, поверхностное число Рэлея, показывает отношение вязких сил, действующих на слой сурфактанта, к диссилиативным силам, связанным со сдвиговой вязкостью в слое. Если при увеличении интенсивности течения параметр упругости становится меньше единицы, то происходит отодвигание сурфактанта течением к периферии с формированием в центре конвективной зоны с интенсивным радиальным течением и неподвижной застойной зоной на периферии. Если поверхностное число Рэлея достигает критического значения, то механическое равновесие в слое нарушается и на поверхности возникает многовихревое течение, периодическое в азимутальном направлении. Для качественной проверки возможности реализации каждого из перечисленных в работе [21] сценариев в рассматриваемой в данной статье задаче, мы

провели серию дополнительных экспериментов с водой различной степени очистки.

Первый из экспериментов был проведен в области параметров колебаний сферы, при котором возникает бегущая волна (см. рис. 9, а), и с использованием водопроводной воды, в которой всегда имеется достаточно большое содержание остаточных поверхностно-активных веществ. На рис. 9, б приведена трековая фотография частиц на поверхности. Видно, что течение на поверхности отсутствует, что говорит о балансе касательных напряжений, формирующихся на поверхности за счет вязких сил и градиента поверхностного давления в слое сурфактанта [21]. На рис. 9, в приведена трековая фотография частиц на поверхности, соответствующая большей амплитуде колебаний сферы. Видно, что увеличение интенсивности течения под поверхностью приводит к нарушению равновесия в слое и формированию двухвихревого течения на поверхности, что говорит о превышении критического значения поверхностным числом Рэлея [21]. Такая двухвихревая структура течения соответствует первой моде SDSL неустойчивости, описанной в работе [21] (см. рис. 5 в [21]). При этом параметр упругости [21] по-прежнему больше единицы, что препятствует формированию «полыньи» в центральной части поверхности. Во втором эксперименте мы использовали бидистиллированную воду, содер-

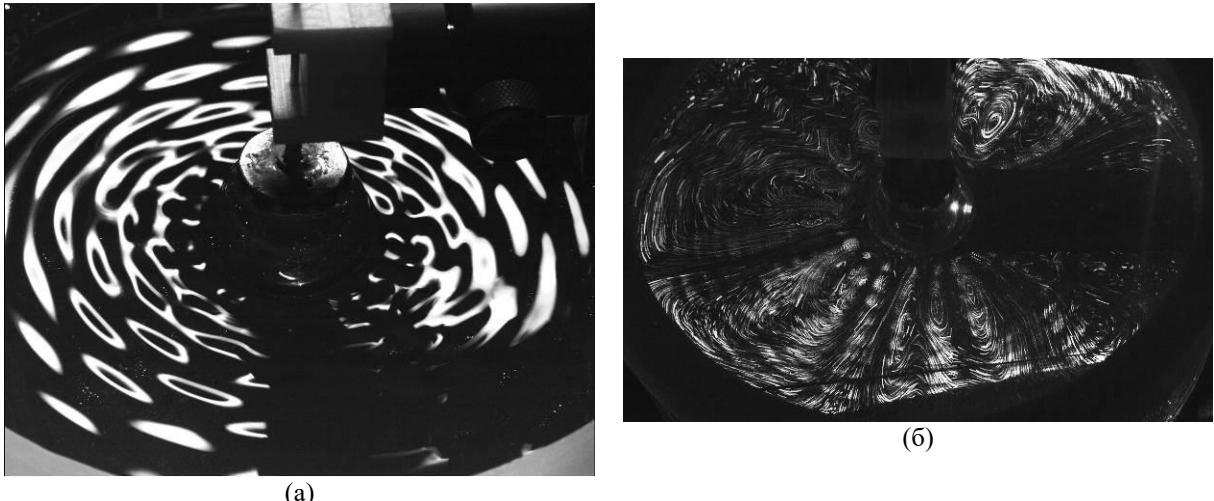


Рис. 10. Конфигурация волны на поверхности (а) и структура осредненного течения (б) на поверхности водопроводной воды с амплитудой колебаний сферы 0.44 мм при частоте колебаний $\omega=40$ Гц

жение остаточных поверхностно-активных примесей в которой значительно меньше. На рис. 9, г приведена трековая фотография, иллюстрирующая структуру течения при параметрах колебаний, как на рис. 9, в. Видно, что уменьшение количества сурфактанта на поверхности приводит к формированию зоны с радиальным течением в центре, так называемой «полыньи», что свидетельствует о величине параметра упругости меньше единицы, т.е. нарушении указанного выше баланса в пользу вязких касательных напряжений. При этом в застойной зоне, сформированной оттесненными течением к периферии молекулами сурфактанта, развивается многовихревое течение, что говорит о превышении критического значения поверхностным числом Рэлея [21]. Наблюдаемая структура течения подобна наблюдавшейся в работе [21] (см. рис. 4 в [21]), несмотря на совершенно иной механизм генерации радиального течения.

Совсем иная структура течения, с точки зрения взаимодействия со слоем сурфактанта, возникает в случае модулированной волны, появляющейся на смену бегущей в результате ее неустойчивости. Интерференция двух спиральных волн приводит к модуляции амплитуды результирующей волны (см. рис. 6, а) и, как следствие, амплитуды скорости течения (см. рис. 6, в) в азимутальном направлении, что приводит к появлению вертикальной составляющей завихренности течения на поверхности. В результате, условия для существования механического равновесия слоя сурфактанта отсутствуют с самого начала. Периодически меняющиеся в азимутальном направлении вязкие напряжения, действующие на слой сурфактанта, должны приводить к его циркуляции вдоль поверхности, а не к симметричному оттеснению к периферии. На рис. 10 приведены изображения структуры волны и трековые изображения структуры течения, полученные в экспериментах с водопроводной водой. Видно, что на поверхности формируется периодическая в азимутальном направлении система вытя-

нутых вихрей, расположение и размеры которых коррелируют с периодичностью изменений амплитуды волны.

4. Заключение

В заключение отметим еще раз наиболее важные результаты исследования. Основным результатом работы, по нашему мнению, является демонстрация методических особенностей постановки экспериментальных исследований в гидродинамических системах с границей раздела жидкость-газ или жидкость-жидкость. Проведение таких исследований должно включать в себя обязательный этап анализа поверхности раздела на наличие поверхностно-активных веществ, даже в следовых количествах. Отсутствие данного этапа может приводить, как минимум, к неверной интерпретации результатов исследования. Данное замечание касается, в первую очередь, экспериментов с поверхностями раздела, имеющими величину поверхностного/межфазного натяжения больше ~40 дин/см, для которых вероятность содержания остаточных примесей, демонстрирующих поверхностную активность по отношению к границе раздела, достаточно велика. Учитывая тот факт, что большинство экспериментальных исследований до сих пор проводятся с водой, это замечание требует аккуратного подхода к анализу полученных в них результатов. Представленные в настоящей статье результаты и их сравнение с имеющимися в научной литературе наглядно демонстрируют указанный тезис. Вторым важным результатом статьи является корректная постановка исследований, позволившая впервые, исходя из наших знаний, наблюдать структуру течения жидкости, сгенерированного поверхностью волной, распространяющейся от колеблющейся полупогруженной сферы. Кроме того, серия дополнительных качественных экспериментов с водой различной степени очистки позволила провести

наиболее достоверную интерпретацию предшествующих экспериментальных исследований.

В момент рассмотрения данной статьи в редакции вышла статья [30], в которой авторы исследуют структуру осредненного течения, генерируемого бегущей волной, порождаемой осцилляциями цилиндрического тела, касающегося торцом поверхности жидкости. В качестве исследуемой жидкости был использован этиловый спирт. Авторы, так же, как и в данной статье наблюдали неустойчивость бегущей круговой волны и потерю осевой симметрии поверхностным течением в режиме модулированной волны. Однако в силу малого диаметра кюветы, по сравнению с осциллирующим телом, в системе наблюдаются более сложные структуры течения (возвратное течение на поверхности, спиральные волны в объеме), обусловленные взаимодействием интенсивного течения с внешними стенками кюветы. В рассматриваемом в данной статье случае большой горизонтальный размер кюветы позволяет избежать указанных осложнений в большей части диапазона амплитуд колебаний сферы. В целом, результаты работы [30] подтверждают сделанный в данной статье вывод о решающей роли наличия сурфактанта на формирование осредненного движения, генерируемого в приповерхностном слое полупогруженным осциллирующим телом.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (тема № 121031700169-1).

Список литературы

1. Schlichting H. Berechnung ebener periodischer Grenzschichtstromungen // Physikalische Zeit. 1932. Vol. 33. P. 327–335.
2. Riley N. Steady streaming // Annual Review of Fluid Mechanics. 2001. Vol. 33, № 1. P. 43–65.
3. Riley N. On a sphere oscillating in a viscous fluid // The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. 1966. Vol. 19, № 4. P. 461–472.
4. Wang C. Y. The flow field induced by an oscillating sphere // Journal of Sound and Vibration. 1965. Vol. 2, № 3. P. 257–269.
5. Davidson B. J., Riley N. Jets induced by oscillatory motion // Journal of Fluid Mechanics. 1972. Vol. 53, № 2. P. 287–303.
6. Alassar R. S. Acoustic streaming on spheres // International Journal of Non-Linear Mechanics. 2008. Vol. 43, № 9. P. 892–897.
7. Kotas C. W., Yoda M., Rogers P. H. Visualization of steady streaming near oscillating spheroids // Experiments in Fluids. 2007. Vol. 42. P. 111–121.
8. Li P. et al. Structure of the streaming flow generated by a sphere in a fluid undergoing rectilinear oscillation // Journal of Fluid Mechanics. 2023. Vol. 974, A37.
9. Stokes G. G. On the theory of oscillatory waves // Trans. Cam. Philos. Soc. 1847. Vol. 8. P. 441–455.
10. Longuet-Higgins M. S. Mass transport in water waves // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1953. Vol. 245, № 903. P. 535–581.
11. Taneda S. Visual observations of the flow around a half-submerged oscillating sphere // Journal of Fluid Mechanics. 1991. Vol. 227. P. 193–209.
12. Punzmann H. et al. Generation and reversal of surface flows by propagating waves // Nature Physics. 2014. Vol. 10, № 9. P. 658–663.
13. Taneda S. Visual observations of the flow around a half-submerged oscillating circular cylinder // Fluid Dynamics Research. 1994. Vol. 13. № 3–4. P. 119–151.
14. Abella A. P., Soriano M. N. Spatio-temporal analysis of surface waves generating octupole vortices in a square domain // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2020. Vol. 130. P. 452–462.
15. Shats M. et al. Wave-generated flows on the water surface // International Journal of Modern Physics: Conference Series. 2016. Vol. 42, 1660179.
16. Sungar N. et al. Synchronization and self-assembly of free capillary spinners // Physical Review E. 2025. Vol. 111, № 3, 035104.
17. Barotta J. W. et al. Bidirectional wave-propelled capillary spinners // Communications Physics. 2023. Vol. 6, № 1, 87.
18. Rhee E. et al. SurferBot: a wave-propelled aquatic vibrobot // Bioinspiration and Biomimetics. 2022. Vol. 17, № 5, 055001.
19. Wang D. et al. Miniature amphibious robot actuated by rigid-flexible hybrid vibration modules // Advanced Science. 2022. Vol. 9, № 29, 2203054.
20. Manikantan H., Squires T. M. Surfactant dynamics: hidden variables controlling fluid flows // Journal of Fluid Mechanics. 2020. Vol. 892, P1.
21. Mizev A., Shmyrov A., Shmyrova A. On the shear-driven surfactant layer instability // Journal of Fluid Mechanics. 2022. Vol. 939, A24.
22. Tatsuno M., Inoue S., Okabe J. Transfiguration of surface waves // Reports of Research Institute for Applied Mechanics. 1969. Vol. 17, № 59. P. 195–216.
23. Taneda S. Transfiguration of surface waves around an oscillating sphere // Fluid Dynamics Research. 1986. Vol. 1, № 1, 1.
24. Xia H., Shats M. Propagating solitons generated by localized perturbations on the surface of deep water // Physical Review E. 2012. Vol. 85, № 2, 026313.
25. Su M. Y. Three-dimensional deep-water waves. Part 1. Experimental measurement of skew and symmetric wave patterns // Journal of Fluid Mechanics. 1982. Vol. 124. P. 73–108.

26. Benjamin T. B., Feir J. E. The disintegration of wave trains on deep water. Part 1. Theory // *Journal of Fluid Mechanics*. 1967. Vol. 27, № 3. P. 417–430.
27. Zakharov V. E. Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep fluid // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1968. Vol. 9, № 2. P. 190–194.
28. Davey A. The propagation of a weak nonlinear wave // *Journal of Fluid Mechanics*. 1972. Vol. 53, № 4. P. 769–781.
29. Hasimoto H., Ono H. Nonlinear modulation of gravity waves // *Journal of the Physical Society of Japan*. 1972. Vol. 33, № 3. P. 805–811.
30. Lyubimova T. P., Lyubimov D. V., Ivanova A. A., Kozlov V. G., Meradji S., Roux B. Mean flows induced by oscillations of a solid body immersed in an isothermal liquid // *Microgravity Science and Technology*. 2025. Vol. 37, № 4, 45.
12. Punzmann H. et al. Generation and reversal of surface flows by propagating waves. *Nature Physics*, 2014, vol. 10, no. 9, pp. 658–663.
13. Taneda S. Visual observations of the flow around a half-submerged oscillating circular cylinder. *Fluid Dynamics Research*, 1994, vol. 13, no. 3-4. pp. 119–151.
14. Abella A. P., Soriano M. N. Spatio-temporal analysis of surface waves generating octupole vortices in a square domain. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2020, vol. 130, pp. 452–462.
15. Shats M. et al. Wave-generated flows on the water surface. *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, 2016, vol. 42, 1660179.
16. Sungar N. et al. Synchronization and self-assembly of free capillary spinners. *Physical Review E*, 2025, vol. 111, no. 3, 035104.
17. Barotta J. W. et al. Bidirectional wave-propelled capillary spinners. *Communications Physics*, 2023, vol. 6, no. 1, 87.
18. Rhee E. et al. SurferBot: a wave-propelled aquatic vibrobot. *Bioinspiration and Biomimetics*, 2022, vol. 17, no. 5, 055001.
19. Wang D. et al. Miniature amphibious robot actuated by rigid-flexible hybrid vibration modules. *Advanced Science*, 2022, vol. 9, no. 29, 2203054.
20. Manikantan H., Squires T. M. Surfactant dynamics: hidden variables controlling fluid flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020. vol. 892, P1.
21. Mizev A., Shmyrov A., Shmyrova A. On the shear-driven surfactant layer instability. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, vol. 939, A24.
22. Tatsumi M., Inoue S., Okabe J. Transfiguration of surface waves. *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*, 1969, vol. 17, no. 59, pp. 195–216.
23. Taneda S. Transfiguration of surface waves around an oscillating sphere. *Fluid Dynamics Research*, 1986, vol. 1, no. 1, 1.
24. Xia H., Shats M. Propagating solitons generated by localized perturbations on the surface of deep water. *Physical Review E*, 2012, vol. 85, no. 2, 026313.
25. Su M. Y. Three-dimensional deep-water waves. Part 1. Experimental measurement of skew and symmetric wave patterns. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, vol. 124, pp. 73–108.
26. Benjamin T. B., Feir J. E. The disintegration of wave trains on deep water. Part 1. Theory. *Journal of Fluid Mechanics*, 1967, vol. 27, no. 3, pp. 417–430.
27. Zakharov V. E. Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep fluid. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1968, vol. 9, no. 2. pp. 190–194.

References

- Schlichting H. Berechnung ebener periodischer Grenzschichtstromungen. *Physikalische Zeit*. 1932. vol. 33. pp. 327–335 (In German)
- Riley N. Steady streaming. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2001, vol. 33, no. 1, pp. 43–65.
- Riley N. On a sphere oscillating in a viscous fluid. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 1966, vol. 19, no. 4, pp. 461–472.
- Wang C. Y. The flow field induced by an oscillating sphere. *Journal of Sound and Vibration*, 1965, vol. 2, no. 3, pp. 257–269.
- Davidson B. J., Riley N. Jets induced by oscillatory motion. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, vol. 53, no. 2, pp. 287–303.
- Alassar R. S. Acoustic streaming on spheres. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2008, vol. 43, no. 9, pp. 892–897.
- Kotas C. W., Yoda M., Rogers P. H. Visualization of steady streaming near oscillating spheroids. *Experiments in Fluids*, 2007, vol. 42, pp. 111–121.
- Li P. et al. Structure of the streaming flow generated by a sphere in a fluid undergoing rectilinear oscillation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2023, vol. 974, A37.
- Stokes G. G. On the theory of oscillatory waves. *Trans. Cam. Philos. Soc.*, 1847, vol. 8, pp. 441–455.
- Longuet-Higgins M. S. Mass transport in water waves. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1953, vol. 245, no. 903, pp. 535–581.
- Taneda S. Visual observations of the flow around a half-submerged oscillating sphere. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, vol. 227, pp. 193–209.
- Punzmann H. et al. Generation and reversal of surface flows by propagating waves. *Nature Physics*, 2014, vol. 10, no. 9, pp. 658–663.
- Taneda S. Visual observations of the flow around a half-submerged oscillating circular cylinder. *Fluid Dynamics Research*, 1994, vol. 13, no. 3-4. pp. 119–151.
- Abella A. P., Soriano M. N. Spatio-temporal analysis of surface waves generating octupole vortices in a square domain. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2020, vol. 130, pp. 452–462.
- Shats M. et al. Wave-generated flows on the water surface. *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, 2016, vol. 42, 1660179.
- Sungar N. et al. Synchronization and self-assembly of free capillary spinners. *Physical Review E*, 2025, vol. 111, no. 3, 035104.
- Barotta J. W. et al. Bidirectional wave-propelled capillary spinners. *Communications Physics*, 2023, vol. 6, no. 1, 87.
- Rhee E. et al. SurferBot: a wave-propelled aquatic vibrobot. *Bioinspiration and Biomimetics*, 2022, vol. 17, no. 5, 055001.
- Wang D. et al. Miniature amphibious robot actuated by rigid-flexible hybrid vibration modules. *Advanced Science*, 2022, vol. 9, no. 29, 2203054.
- Manikantan H., Squires T. M. Surfactant dynamics: hidden variables controlling fluid flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020. vol. 892, P1.
- Mizev A., Shmyrov A., Shmyrova A. On the shear-driven surfactant layer instability. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, vol. 939, A24.
- Tatsumi M., Inoue S., Okabe J. Transfiguration of surface waves. *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*, 1969, vol. 17, no. 59, pp. 195–216.
- Taneda S. Transfiguration of surface waves around an oscillating sphere. *Fluid Dynamics Research*, 1986, vol. 1, no. 1, 1.
- Xia H., Shats M. Propagating solitons generated by localized perturbations on the surface of deep water. *Physical Review E*, 2012, vol. 85, no. 2, 026313.
- Su M. Y. Three-dimensional deep-water waves. Part 1. Experimental measurement of skew and symmetric wave patterns. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, vol. 124, pp. 73–108.
- Benjamin T. B., Feir J. E. The disintegration of wave trains on deep water. Part 1. Theory. *Journal of Fluid Mechanics*, 1967, vol. 27, no. 3, pp. 417–430.
- Zakharov V. E. Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep fluid. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1968, vol. 9, no. 2. pp. 190–194.

28. Davey A. The propagation of a weak nonlinear wave. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, vol. 53, no. 4, pp. 769–781.
29. Hasimoto H., Ono H. Nonlinear modulation of gravity waves. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1972, vol. 33, no. 3, pp. 805–811.
30. Lyubimova T. P., Lyubimov D. V., Ivanova A. A., Kozlov V. G., Meradji S., Roux B. Mean flows induced by oscillations of a solid body immersed in an isothermal liquid. *Microgravity Science and Technology*, 2025, vol. 37, no. 4, 45.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Мизёв А. И., Панькова Н. В. Генерация осредненного течения полупогруженной осциллирующей сферой // Вестник Пермского университета. Физика. 2025. № 3. С. 22–33. doi: 10.17072/1994-3598-2025-3-22-33

Please cite this article in English as:

Mizev A. I., Pan'kova N. V. Generation of an average flow by a semi-submerged oscillating sphere. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2025, no. 3, pp. 22–33. doi: 10.17072/1994-3598-2025-3-22-33

Сведения об авторах

1. Алексей Иванович Мизёв, д-р. физ.-мат. наук, директор, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королёва, 1, Пермь, 614013
2. Надежда Владимировна Панькова, аспирант, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королёва, 1, Пермь, 614013

Author information

1. Aleksey I. Mizev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia
2. Nadezhda V. Pan'kova, Postgraduate Student, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia