

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ КАПЛЕ С УПРУГОЙ ГРАНИЦЕЙ

Щипицын В.Д.¹, Вяткин А.А.¹, Козлов Н.В.¹

ФГБОУ ВПО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет», Пермь, Россия (614990, г. Пермь, ул. Сибирская, 24), e-mail: Schipitsyn@pspu.ru

Статья посвящена экспериментальному исследованию осредненных течений изотермической жидкости, возбуждаемых в осциллирующей полости. Полость представляет собой двумерную модель капли и имеет форму эллиптического цилиндра с упругой границей. В работе подробно описана экспериментальная установка и методика проведения эксперимента. Обнаружено, что в осциллирующей капле развивается осредненное течение в виде вихрей, захватывающее весь объем полости. Изучено влияние вязкости жидкости и параметров вибраций (амплитуды и частоты) на структуру и интенсивность осредненных течений. Изучены характерные режимы осредненных течений и закономерности их трансформации в зависимости от безразмерной частоты вибраций. По результатам исследований для описания осредненного течения жидкости внутри капли найдены управляющие безразмерные параметры. На плоскости вибрационных параметров экспериментально измеренные значения скорости удовлетворительно согласуются между собой.

Ключевые слова: эксперимент, вибрации, потоки, капля.

EXPERIMENTAL STUDY OF FLUID FLOW INSIDE OSCILLATING DROP WITH ELASTIC BORDER

Schipitsyn V.D.¹, Vyatkin A.A.¹, Kozlov N.V.¹

Perm State Humanitarian Pedagogical University, Perm, Russia (614990, Perm, street Sibirskaya, 24), e-mail: Schipitsyn@pspu.ru

This article is devoted to the experimental investigation of steady streaming of isothermal liquid excited inside oscillating cavity. The cavity is a 2D model of a drop and it has the form of elliptical cylinder with elastic border. The problem formulation, experimental setup and technique are described in detail. The vortical bulk flow of liquid is found. The effect of vibrational parameters (amplitude and frequency) and fluid viscosity on the structure and intensity of steady streaming is studied. The various regimes of fluid flows are found and transitions between these regimes in dependence on dimensionless frequency of vibrations are studied. The paper documents governing dimensionless parameters for the problem of onset of steady streaming. The experimental results on steady streaming velocity qualitatively agree with each other on the plane of dimensionless vibrational parameters.

Keywords: experiment, vibrations, steady streaming, drop.

В работе [3] представлен обзор механизмов возбуждения осредненных течений, возникающих в жидкости на фоне высокочастотных осцилляций. В случае вязкой несжимаемой жидкости, осциллирующей вблизи твердой стенки, в вязких слоях Стокса [5] генерируются осредненные течения, увлекающие за собой жидкость во всем объеме полости. Исследование осредненных течений в замкнутых полостях, совершающих вращательные вибрации [4; 7], обычно проводятся в высокочастотном пределе, когда толщина Стокса значительно меньше характерного размера полости. В работе [1] экспериментально исследованы осредненные потоки в полости квадратного сечения. Показано, что структура осредненных потоков трансформируется, в частности направление течения жидкости сменяется на противоположное при переходе от высокочастотного предела к низкочастотному. В [2] экспериментально изучены структура и интенсивность осредненного

движения вязкой несжимаемой жидкости в длинном канале прямоугольного сечения при вращательных вибрациях. Найдены безразмерные комплексы, определяющие интенсивность осреднённых потоков в широком интервале безразмерных частот.

В предлагаемой работе экспериментально исследуется структура и интенсивность осредненных течений изотермической жидкости, возбуждаемых в цилиндрической полости с упругой границей. Изучается влияние параметров вибраций и жидкости на структуру и интенсивность течений и закономерности их трансформации. Исследования проводятся в широком интервале значений безразмерной частоты вибраций.

1. Экспериментальная установка и методика

Двумерная модель капли представляет собой цилиндрическую полость кругового сечения длиной $L = 150.0$ мм и радиусом $R = 22.8$ мм (положение капли относительно оси вибраций показано на рис. 1). Стенки кюветы изготовлены из упругого эластичного полиэтилена, что позволяет ей сжиматься и расширяться под действием вибрационного воздействия. Торцы кюветы герметично закрыты фланцами из плексигласа. При заполнении кюветы рабочей жидкостью внутри нее создается избыточное давление. Для этого в одном из торцов полости имеется заливное отверстие с нагнетательным клапаном. В качестве рабочей жидкости используются водоглицериновые растворы, вязкость которых варьируется в диапазоне $\nu = 1-100$ сСт (плотность жидкости изменяется в интервале $\rho_L = 1-1.23$ г/см³).

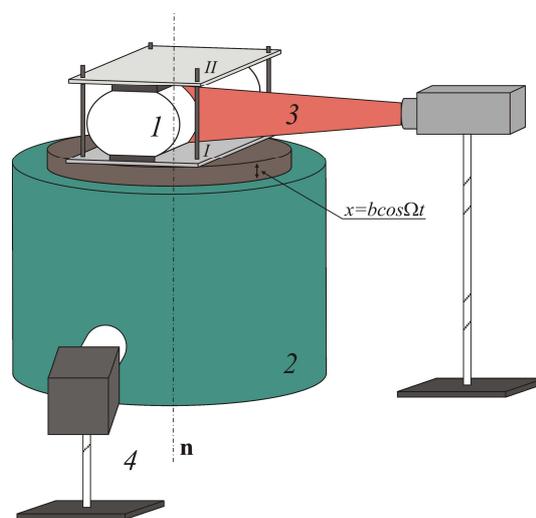


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – кювета, 2 – электродинамический вибратор, 3 – световой нож (лазер), 4 – камера, линия n – ось вибраций.

Кювета 1 (рис. 1), заполненная рабочей жидкостью, закрепляется на столике электродинамического вибратора 2 [2]. Конструкция крепления кюветы разработана таким образом, что изначально полость оказывается сжатой между подвижной I и неподвижной II пластинами-активаторами, вследствие чего сечение кюветы принимает форму эллипса, большая ось которого ориентирована горизонтально. Подвижная пластина I располагается непосредственно на столике вибратора, который совершает вертикальные гармонические колебания по закону $x = b \cos \Omega t$. Амплитуда и линейная частота вибраций могут варьироваться в интервалах $b = 0.1-5$ мм и $f \equiv \Omega / (2\pi) = 0.1-50$ Гц. В ходе опыта из-за

упругих свойств стенок вибрационное воздействие на кювету передается практически одинаково как со стороны нижней (подвижной), так и со стороны верхней (неподвижной) пластины. Вибрации осуществляются вдоль малых полуосей эллипса. Эксперимент проводится при заданных значениях v , b и f .

Для измерения вязкости жидкости используется капиллярный вискозиметр (относительная погрешность не превышает 0.1%), для измерения плотности – ареометр (с точностью 0.001 г/см³). Амплитуда вибраций измеряется при помощи оптического катетометра типа В-630 (0.1 мм) или с экрана монитора при обработке видеозаписи; частота вибраций задается и контролируется универсальным измерительным комплексом ZET Lab (0.1 Гц).

Движение жидкости визуализируется светорассеивающими частицами Resine Amberlite размером 60 мкм и плотностью, близкой к плотности рабочей жидкости. Подсветка течений осуществляется световым ножом 3 (используется мощный лазер-генератор линий модели Z500Q), расположенным перпендикулярно оси вибраций. Структура течений регистрируется при помощи видеокамеры 4 (рис. 1). Поскольку движение жидкости складывается из колебательного (относительно стенок полости) и осредненного, возникающего на фоне колебаний, видеосъемка процесса осуществляется в системе отсчета полости (за счет синхронизации частоты видеосъемки с частотой вибраций полости). В зависимости от скорости осредненного движения жидкости выдержка видеосъемки изменяется в диапазоне от 1/100 до 1/1000. За это время светорассеивающие частицы на паре соседних кадров успевают «сместиться» на некоторое расстояние (рис. 2). Для вычисления распределения скоростей в пределах пары изображений и структуры осредненных течений как во всем объеме, так и в заданной точке полости используется PIV-методика, осуществляемая посредством специализированного программного обеспечения PIVlab (встраиваемый модуль MATLAB) на компьютере. Данный модуль позволяет получать, отображать и экспортировать такие параметры, как тангенциальная и касательная компоненты скорости потоков, их завихренность, дивергенция и т.д.

2. Результаты эксперимента

Вибрационное воздействие на стенки капли вызывает колебания жидкости внутри нее, что приводит к генерации осредненных потоков. Структура потоков и интенсивность их осредненного движения определяются безразмерной частотой вибраций $\omega = \Omega R^2 / \nu$. В наших экспериментах осредненное течение имеет двумерную структуру, представляющую собой систему вихрей, вытянутых вдоль кюветы и согласованно вращающихся. В большинстве опытов картина течения обладает зеркальной симметрией относительно большой и малой осей сжатой кюветы (эллипса). Небольшое нарушение симметрии в

отдельных экспериментах можно объяснить не совсем симметричным характером вибрационного воздействия на саму кювету. В области очень интенсивных вибраций устойчивость двумерного течения и его симметрия нарушаются, в объеме полости возникают сложные трехмерные потоки.

На рис. 2 представлены векторные поля скорости потоков (перпендикулярное сечение кюветы), возникающих в объеме жидкости, полученные при PIV-обработке видеозаписей экспериментов, проводимых при изменении вязкости жидкости и параметров вибраций.

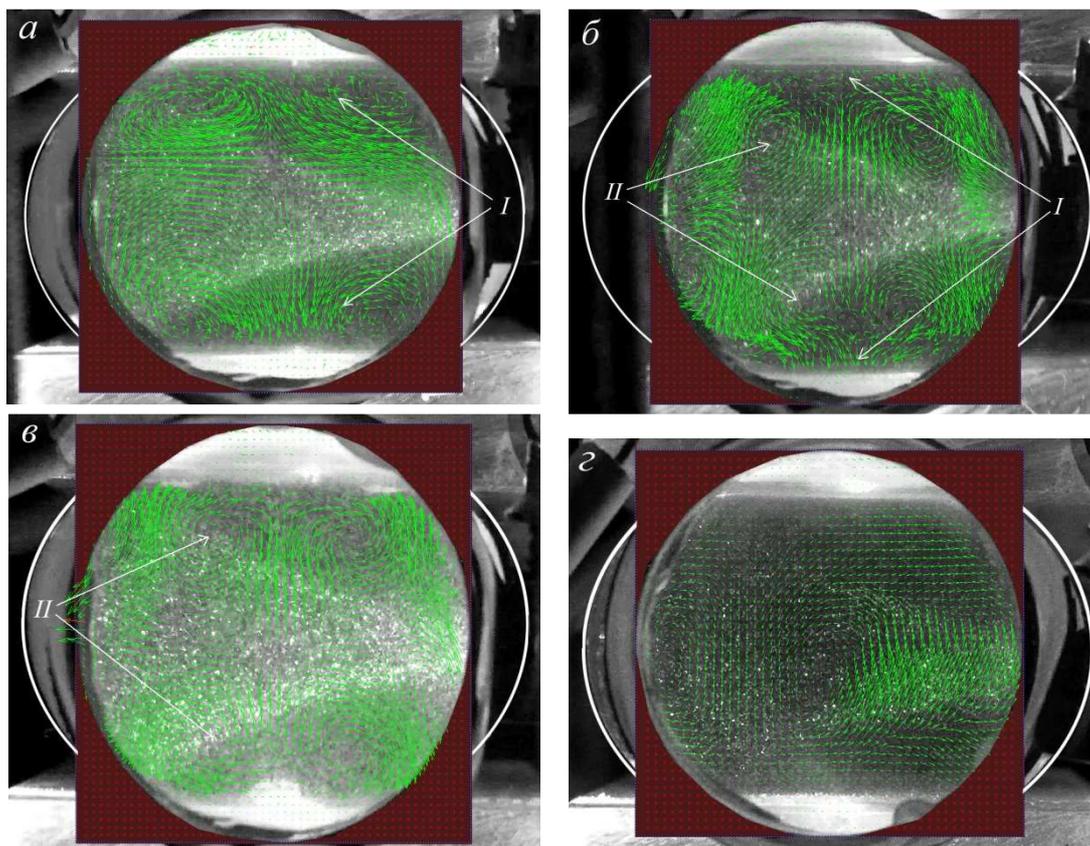


Рис. 2. Вид и схема течений водоглицериновой смеси: а – $f = 5.0$ Гц, $b = 2.1$ мм, $\nu = 84$ сСт; б – $f = 16.0$ Гц, $b = 3.2$ мм, $\nu = 35$ сСт; в – $f = 12.0$ Гц, $b = 3.0$ мм, $\nu = 10$ сСт; г – $f = 10.0$ Гц, $b = 0.6$ мм, $\nu = 4$ сСт.

При сравнительно невысоких значениях безразмерной частоты вибраций в экспериментах с жидкостью большой вязкости ($\nu = 84$ сСт) в объеме полости формируется осредненное течение, представляющее собой систему согласованно вращающихся вихрей (рис. 2а, $\omega = 7.8 \cdot 10^2$). При этом вихри большего размера I находятся вблизи верхнего и нижнего полюсов кюветы и вращаются согласованно друг с другом, формируя потоки, направленные к полюсам. Можно заметить, что скорость частиц, величина которой определяется длиной векторов, оказывается максимальной в струях, бьющих к полюсам капли. Это значение скорости в дальнейшем будет использоваться для числовой характеристики возникающего осредненного течения.

Структура осредненного течения в осциллирующей капле качественно изменяется с увеличением безразмерной частоты вибраций: вихри *I* принимают вытянутую «приплюснутую» форму и смещаются ближе к стенке кюветы. Под ними формируется новая система – «внешние» вихри *II*, имеющие противоположное направление вращения (рис. 2б, $\omega = 6.1 \cdot 10^3$). Картина осредненного течения становится «двухуровневой». Повышение частоты вибраций приводит к увеличению и размера, и интенсивности вихрей *II*.

В случае высоких частот вибраций вихри *I*, расположенные в пограничных слоях Стокса, становятся настолько тонкими, что оказываются практически неразличимыми (рис. 2в, $\omega > 16.5 \cdot 10^3$). Вихри *II* формируют картину, по структуре близкую к низкочастотному случаю (рис. 2а), но с противоположным направлением закрутки. Теперь образовавшиеся струи бьют от полюсов кюветы, а их интенсивность близка к низкочастотному случаю.

В опытах с маловязкими жидкостями при интенсивном вибрационном воздействии обнаружена неустойчивость симметричного движения, когда во всем объеме кюветы развивается один большой центральный вихрь (рис. 2г, $\omega > 35.5 \cdot 10^3$).

Для описания и анализа экспериментальных результатов условно разделим область безразмерных частот на низкие, $\omega < 10^3$, умеренные, $10^3 < \omega < 10^4$, и высокие, $\omega > 10^4$.

В низкочастотном диапазоне в качестве основной характеристики потока выберем скорость струи, которая генерируется вихрями *I* и направлена к полюсам осциллирующей капли. При заданной вязкости жидкости и фиксированном значении амплитуды вибраций с повышением частоты скорость жидкости в струе v_{in} увеличивается (рис. 3а). Увеличение амплитуды вибраций при постоянной частоте также приводит к монотонному повышению скорости струи v_{in} (рис. 3б).

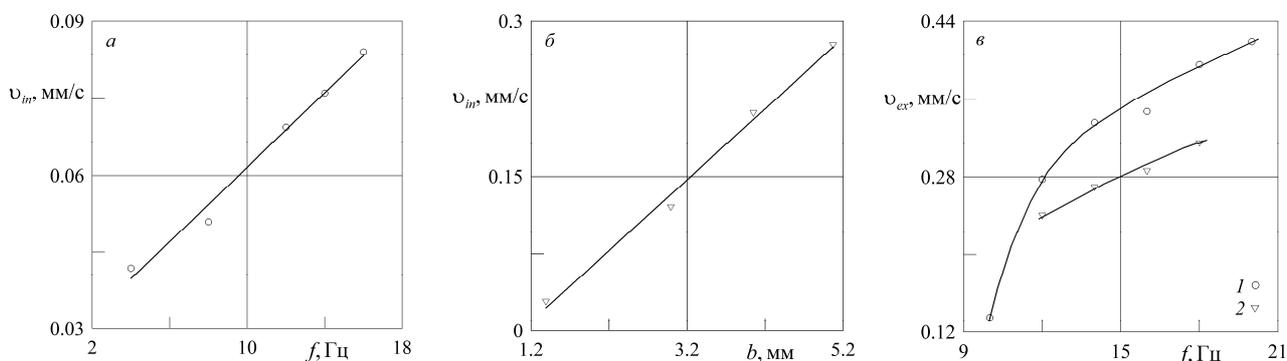


Рис. 3. Зависимость максимальной скорости v струи от частоты (а, в) и амплитуды (б) вибраций: а – $\nu = 35$ сСт, $b = (2.6 \pm 0.5)$ мм; б – $\nu = 96$ сСт, $f = 8.0$ Гц; в – $\nu = 6$ сСт, $b = (2.6 \pm 0.2)$ мм (кривая 1), $\nu = 10$ сСт, $b = (2.8 \pm 0.3)$ мм (кривая 2).

В области высоких и умеренных значений безразмерной частоты измерение скорости вихрей, генерируемых в пограничных слоях, становится практически невозможным по причине их малой толщины. Поэтому в качестве характерной скорости потоков была выбрана скорость струи, сформированная внешними вихрями Π и направленная от полюсов кюветы. При постоянном значении вязкости $\nu = 6 \text{ сСт}$ скорость жидкости v_{ex} монотонно повышается с увеличением частоты вибраций f (рис. 3в); амплитуда вибрационного воздействия в ходе экспериментов поддерживается постоянной, $b = (2.6 \pm 0.2) \text{ мм}$ (рис. 3в, кривая 1). При повышении вязкости жидкости кривая скорости движения v_{ex} смещается в область меньших значений (кривая 2; $b = (2.8 \pm 0.3) \text{ мм}$, $\nu = 10 \text{ сСт}$).

3. Обсуждение результатов

В случае высоких безразмерных частот ($\omega > 10^4$) определяющим вибрационным параметром является пульсационное число Рэлея Re_p [1], которое в условиях нашей задачи примет вид $Re_p = b^2 \Omega / \nu$. Течение, возникающее в объеме кюветы, генерируется за счет касательных к поверхности осредненных потоков, формирующихся на внешней границе слоя Стокса, и увлекающих за собой остальной объем жидкости. Безразмерная скорость осредненного течения в объеме полости $v_{ex} R / \nu$ пропорциональна Re_p [3; 6].

На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость безразмерной скорости $v_{ex} R / \nu$ внешних потоков (струй), направленных от полюсов кюветы, построенная по результатам опытов с жидкостями различной вязкости при варьировании параметров вибраций (b, f). Результаты находятся в хорошем согласии между собой на плоскости управляющих параметров $v_{ex} R / \nu, Re_p$. Безразмерная скорость монотонно возрастает с повышением пульсационного числа Рэлея, тем самым доказывая, что полученные результаты соответствуют области высокочастотной асимптотики.

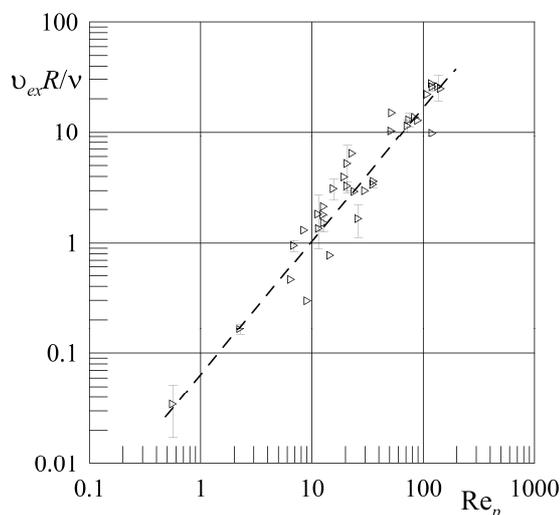


Рис. 4. Зависимость безразмерной скорости струи $v_{ex} R / \nu$ от Re_p ; $f = 4 - 50 \text{ Гц}$, $b = 0.6 - 3.3 \text{ мм}$, $\nu = 6 - 96 \text{ сСт}$.

Для характеристики скорости потоков введем безразмерный параметр $V_{ex} = v_{ex} R / b^2 \Omega$ [1], где в качестве единицы измерения выбрана скорость осредненного движения жидкости,

возбуждаемого в неоднородном слое Стокса при $\omega \gg 1$. В случае высоких безразмерных частот в условиях ламинарного течения (область малых Re_p) параметр V_{ex} не должен изменяться с частотой. Экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются на плоскости ω, V_{ex} (рис. 5а). Параметр V_{ex} монотонно повышается с увеличением ω , асимптотически приближаясь к постоянному значению в области $\omega > 2.5 \cdot 10^4$.

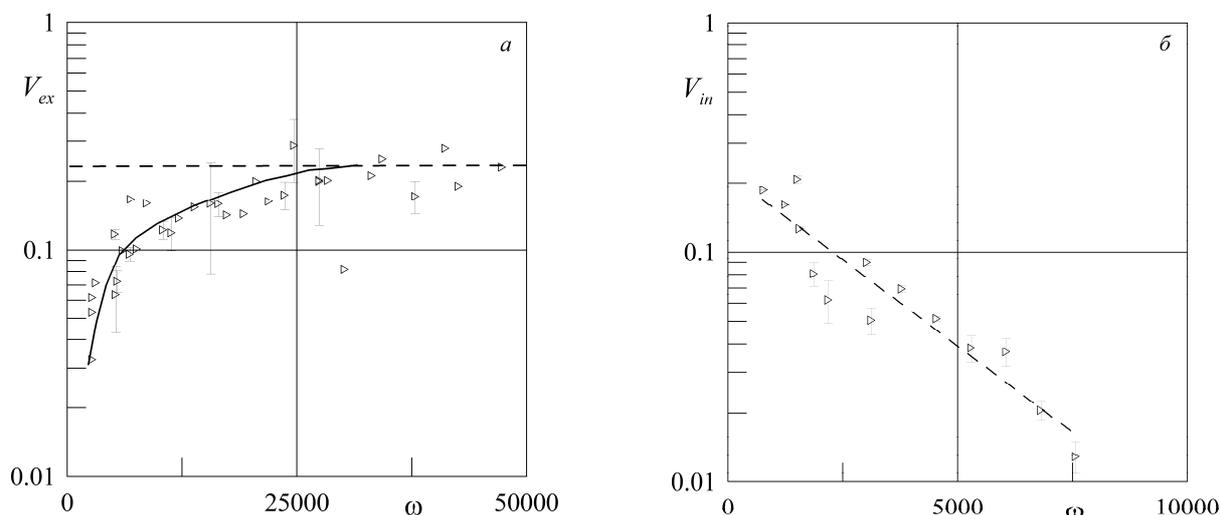


Рис. 5. Зависимость от частоты ω параметра $V_{ex} = v_{ex} R / b^2 \Omega$ для высоких частот (а) и параметра $V_{in} = v_{in} R / b^2 \Omega$ для низких частот (б): $f = 4 - 50 \text{ Гц}$, $b = 0.6 - 3.3 \text{ мм}$, $\nu = 6 - 96 \text{ сСт}$ (а); $f = 4 - 30 \text{ Гц}$, $b = 1.5 - 3.3 \text{ мм}$, $\nu = 35 - 84 \text{ сСт}$ (б).

В случае малых безразмерных частот вибраций толщина слоя Стокса становится сравнимой с характерными размерами полости. Для характеристики осреднённой скорости жидкости выберем тот же безразмерный параметр, что и для высокочастотного случая. Экспериментальные результаты по измерению скорости осредненных течений при малых и умеренных значениях ω , полученные при изменении вязкости жидкости и параметров вибраций, также вполне удовлетворительно согласуются между собой на плоскости ω, V_{in} (рис. 5б). Характерные значения скорости течения жидкости в том и другом случае оказываются близкими по порядку величины. Однако по частоте кривые сдвинуты относительно друг друга на несколько порядков.

Таким образом, как при низких, так и при высоких значениях безразмерной частоты в качестве управляющих безразмерных комплексов при описании осредненного течения жидкости внутри капли могут быть выбраны параметры $\omega = \Omega R^2 / \nu$ и $V = v R / b^2 \Omega$.

Заключение. В рамках настоящей работы изготовлена экспериментальная установка, разработана и апробирована методика, изучены структуры и интенсивность осредненных потоков изотермической жидкости, возникающих в осциллирующей капле с упругой границей. Изучено влияние параметров жидкости и вибраций на закономерности

трансформации генерируемых потоков и интенсивность их течений. Опыты проведены в широком интервале безразмерных частот вибраций. Выделено три характерных диапазона по частоте: низкие, умеренные и высокие частоты, для каждого из которых характерна своя картина течений. Показано, что, помимо безразмерной частоты вибраций ω , осредненное движение жидкости может быть охарактеризовано безразмерным параметром V .

Полученные результаты могут представлять теоретический и практический интерес для занимающихся задачами, связанными с интенсификацией процессов перемешивания жидкости внутри осциллирующей полости, а также вибрационной конвекции жидкости.

Работа выполнена в рамках программы стратегического развития Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета (проект 029-Ф) и задания Минобрнауки РФ 2014/372 (проект 2176) при поддержке Министерства образования Пермского края (проект С 26/625).

Список литературы

1. Иванова А.А., Козлов В.Г. Вибрационная конвекция при непоступательных колебаниях полости. Изотермический случай // Изв. РАН. МЖГ. – 2003. – № 2. – С. 25–32.
2. Иванова А.А., Козлов В.Г., Селин Н.В. Осредненное движение жидкости в торцевых областях длинного канала при его вращательных колебаниях // Изв. РАН. МЖГ. – 2005. – № 3. – С. 7–44.
3. Ниборг В. Акустические течения // Физическая акустика / под ред. У. Мэзона. – М. : Мир, 1969. – Т. 2. – Ч. Б. – С. 302–377.
4. Повицкий А.С., Любин Л.Я. Основы динамики и тепломассообмена жидкостей и газов при невесомости. – М. : Машиностроение, 1972. – 252 с.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М. : Наука, 1974. – 711 с.
6. Gershuni G.Z., Lyubimov D.V. Thermal Vibrational Convection. – N.Y. : Wiley, 1998. – 358 p.
7. Ivanova A.A., Kozlov V.G., Lyubimov D.V., Lyubimova T.P. Convective processes in a fluid subjected to static gravity and non-translational oscillations // Abstr. 9th Europ. symp. on Gravity-Dependent Phenomena in Physical Sciences. – Berlin, 1995. – P. 291.

Рецензенты:

Козлов В.Г., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики, ФГБОУ ВПО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет», г. Пермь.

Иванова А.А., д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории вибрационной гидромеханики, ФГБОУ ВПО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет», г. Пермь.