

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ ПРИ ВРАЩЕНИИ

Козлов Н.В.¹, Шувалова Д.А.¹

¹ФГБОУ ВПО «Пермский Государственный гуманитарно-педагогический университет», Пермь, e-mail: kozlovn@pspu.ru, shuvalovada@gmail.com

Экспериментально изучается динамика границы раздела двух несмешивающихся жидкостей различной плотности в горизонтальной цилиндрической полости при вращении. Под действием центробежной силы жидкости распределяются в виде вложенных цилиндров – столб легкой жидкости занимает устойчивое положение вдоль оси вращения полости. В системе отсчета полости вектор силы тяжести вращается, что приводит к колебаниям внутренней жидкости. При этом ось столба легкой жидкости движется по окружности. На границе раздела при этом распространяется инерционная волна малой амплитуды, которая генерирует медленное отстающее движение. Волна проявляет себя в радиальном смещении столба легкой жидкости относительно оси полости. Это смещение стационарно в лабораторной системе отсчета. При повышении интенсивности дифференциального вращения наблюдается возрастание амплитуды колебаний столба легкой жидкости. По достижении критической скорости вращения на границе развивается возмущение в виде гребней, вытянутых вдоль оси вращения. Рассматривается методика измерения амплитуды колебаний границы раздела. Изучено влияние скорости вращения полости на амплитуду волны, которая возбуждается на цилиндрической границе раздела. Проводится сравнение экспериментальных значений амплитуды с теоретическими.

Ключевые слова: вращение, граница раздела, пограничный слой Стокса, среднее течение, инерционные колебания, центробежные волны

EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF INERTIAL OSCILLATIONS OF IMMISCIBLE LIQUIDS INTERFACE IN A HORIZONTAL CYLINDRICAL CAVITY AT ROTATION

Kozlov N.V.¹, Shuvalova D.A.¹

¹Perm State Humanitarian Pedagogical University, Perm, e-mail: kozlovn@pspu.ru, shuvalovada@gmail.com

Dynamics of interface of two immiscible liquids of different densities is studied experimentally in a horizontal cylindrical cavity under rotation. Under the action of the centrifugal force the liquids are distributed as nested cylinders, the light liquid column is distributed steadily along the cavity rotation axis. In the cavity reference system the gravity vector is rotating that leads to oscillations of internal liquid. Thus, the axis of the column of light liquid moves on a circle. As a result, an inertial wave of small amplitude propagates at the interface and generates the slow lagging motion of fluid. The wave manifests itself in a radial shift of the light liquid column relative to the cavity axis. This shift is stationary in the laboratory frame. With increase of intensity of differential rotation an increase of oscillation amplitude of light liquid column is observed. Upon reaching the critical rotation speed a disturbance develops at the boundary in the form of crests extended along the rotation axis. The measurement technique of amplitude of interface oscillations is considered. Influence of cavity rotation speed on the amplitude of the wave excited on the cylindrical interface is shown. Comparison of experimental values of amplitude with theoretical ones is carried out.

Key words: rotation, interface, Stokes boundary layer, steady streaming, inertial oscillations, centrifugal waves

Вращающиеся гидродинамические системы часто встречаются в природе и технике. Такие системы обладают рядом основных свойств: их динамика в значительной мере определяется действием сил инерции, Кориолиса и центробежной силы. Примерами таких систем могут послужить как океаны и моря, так и различные механические системы, действующие на основе вращения.

Системы с границей раздела интересны для изучения как с точки зрения развития представлений фундаментальной науки, так и с позиции изучения гетерогенных систем и

методов и способов воздействия на них. Как вблизи твердой стенки, так и вблизи границы раздела при вибрациях возникает вязкий пограничный слой. Генерация средних течений вблизи поверхности раздела сплошных сред изучалась Дором [4], анализ течений в стоковских слоях показал, что они являются местом генерации средних течений вихревого характера, распространяющихся за пределы скин-слоев [3]. Вибрации различного рода приводят к дисбалансу касательных напряжений на границе раздела, а, следовательно, и касательных скоростей. Вибрационное воздействие является мощным механизмом управления для всех неоднородных систем.

В работе [5] рассмотрена динамика границы раздела двух несмешивающихся жидкостей в горизонтальном вращающемся цилиндре при касательных колебаниях границы раздела, в частности, изучена устойчивость системы в зависимости от разницы плотностей жидкостей. В работе [2] рассмотрен случай вращения в поле тяжести, внимание уделено роли отношения кинематических вязкостей жидкостей. Экспериментальное изучение неустойчивости, а также массопереноса, на границе раздела жидкостей позволит расширить знания об управлении подобными системами.

Цель исследования, представленного в данной работе, изучение инерционных колебаний столба легкой жидкости, измерение амплитуды этих колебаний, их сравнение с теоретически полученной зависимостью.

Экспериментальная установка и методика измерения

Для изучения колебаний столба внутренней жидкости используется установка, приведенная на рис.1. Цилиндрическая кювета 1, изготовленная из прозрачного оргстекла, длиной $L = 7.2$ см и радиусом $R = 2.6$ см заполняется двумя жидкостями разной плотности: легкой 2 и тяжелой 3. Кювета закреплена на оси 4, которая, в свою очередь, закреплена в опоре 5. Вращение полости задается с помощью шагового двигателя 6, который соединен с осью посредством соосной гибкой передачи 7. Установка закреплена на неподвижном столике 8.

Измерения колебаний столба внутренней жидкости проводятся по изображениям, полученным при помощи скоростной видеокамеры 9, которая выставляется строго соосно оси вращения кюветы. Полипропиленовые частицы размером $0.3 - 0.7$ мм помещаются на границу раздела жидкостей для её наблюдения. Лазерный нож 10 располагается перпендикулярно оси вращения полости и устанавливается таким образом, чтобы освещать геометрический центр длины полости.

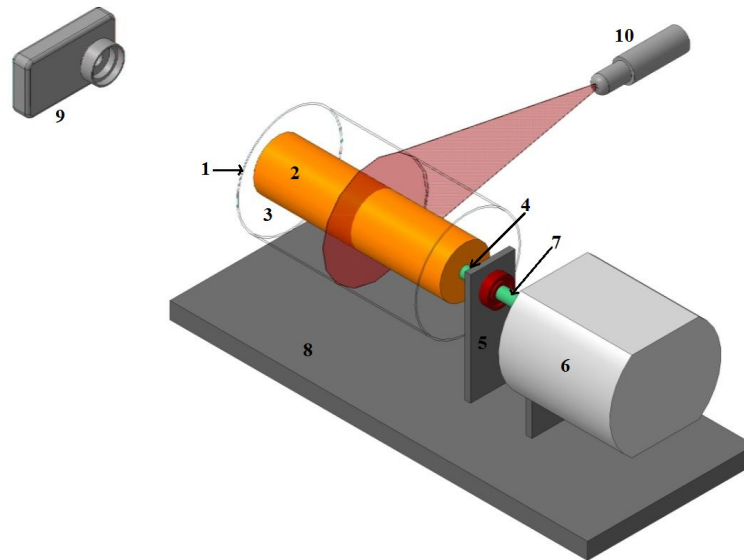


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

1– цилиндрическая кювета с рубашкой, 2 – раствор медного купороса, 3 – флуоринерт FC-40, 4 – ось, 5 – опора, 6– шаговый электродвигатель, 7– гибкая передача, 8– неподвижный столик, 9- скоростная видеокамера, 10- лазер

В качестве рабочих жидкостей используются индустриальное масло и водный раствор глицерина. Данная двухфазная система характеризуется относительной плотностью входящих в нее жидкостей $\rho = \rho_i / \rho_o$, где ρ_i – плотность легкой жидкости, ρ_o – плотность тяжелой жидкости. Отношение вязкостей $N = \nu_i / \nu_o$ (ν_i – кинематическая вязкость легкой жидкости, ν_o – кинематическая вязкость тяжелой жидкости) также является одним из параметров описания системы несмешивающихся жидкостей. Значения наиболее важных параметров системы представлены в Таблице.

Основные параметры жидкостей		
	Индустриальное масло	Водоглицериновый раствор
Вязкость, сСт	18.2	17.8
Плотность, г/см³	0.88	1.24
Относительная вязкость	1.02	
Относительная плотность	0.71	
Относительный объем	0.20 – 0.85	

В эксперименте варьируется относительный объем кюветы, определенный как $q = V_i / V$, где V_i – объем столба внутренней жидкости, а V – полный объем цилиндрической полости.

В ходе проведения эксперимента задается скорость вращения кюветы f_r , при этом измеряется скорость границы раздела f_i методом синхронизации скорости вращения полипропиленовых частиц, движущихся вместе с межфазной поверхностью, с частотой мерцания стробоскопической лампы, которая задается при помощи генератора сигналов Руднев - Шиляев ГСПФ-052 с точностью 0.001 Гц. Наблюдения и измерения проводятся в стробоскопическом освещении. Скорость вращения полости изменяется в интервале значений $f_r = 0 - 20$ об/с.

Перед началом эксперимента проводится калибровочная съемка скоростной видеокамерой в естественном освещении, объектив камеры фокусируется на слой, освещаемый лазерным ножом (рис. 2, а). Лазерный луч при этом очерчивает окружность по внутренней стенке полости. При обработке калибровочных кадров измеряется диаметр кюветы.

В начале эксперимента скорость вращения кюветы задается такой, чтобы жидкости центрифугировались. Затем скорость вращения кюветы медленно понижается до необходимого значения, проводятся все необходимые измерения при неизменной f_r . Для проведения съемки видеокамерой устанавливается такая частота кадров, чтобы на один оборот кюветы укладывалось их целое число, а также подбирается необходимое значение экспозиции для получения оптимального отображения частиц на границе. Полученное видео конвертируется в изображение формата bmp (рис. 2, б, в). Обработка изображений проводится при помощи программы ImageJ, позволяющей обрабатывать пакет фотографий одновременно.

Погрешности обработки изображений обусловлены как засвечиванием частиц, так и их различными размерами и формами, а, следовательно, и нахождением координат их центра. Следует отметить и малость амплитуды по сравнению с радиусом столба внутренней жидкости.

Результаты

При достаточно быстром вращении под действием центробежной силы жидкости центрифугируются, образуя пару коаксиальных цилиндрических слоев, легкая жидкость формирует столб постоянного радиуса R_i (рис. 2, г). При вращении полости в поле силы тяжести, когда ось вращения кюветы горизонтальна, внутренний столб легкой жидкости совершает круговые двумерные колебания в системе отсчета полости. Это происходит потому, что вектор силы тяжести перпендикулярен оси вращения кюветы и вращается в системе отсчета полости. В лабораторной системе отсчета колебания легкой жидкости проявляются в малом стационарном смещении столба b_c (рис. 2, г). Колебания столба внутренней жидкости в свою очередь являются причиной генерации средней массовой силы

в пограничных слоях вблизи стенки полости, а также на границе раздела. Сила направлена тангенциально и возбуждает среднее дифференциальное вращение жидкости, интенсивность которого определяется безразмерной амплитудой $\Gamma = g / (4\pi^2 f_r^2 R_i)$ [6]. С понижением скорости вращения кюветы дифференциальная скорость границы раздела $\Delta f = f_i - f_r$ медленно увеличивается по модулю, доходя до определенного критического значения.

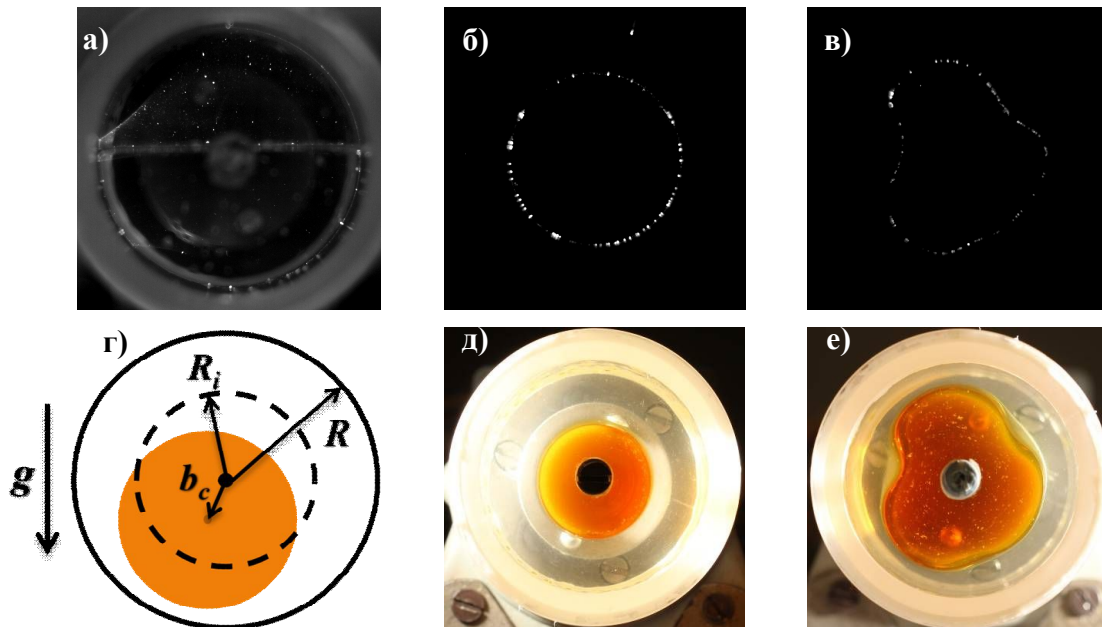


Рис.2. Профиль границы раздела.

Результаты съемки скоростной видеокамерой при $q=0.46$: а) – калибровочный кадр; б) – вид границы раздела в центрифугированном состоянии, $f_r=6.20$ об/с; в) – вид границы раздела при наличии волны с азимутальным числом 3, $f_r=6.14$ об/с; г) – схема колебания столба легкой жидкости; д) – вид границы раздела в центрифугированном состоянии, $f_r=10.20$ об/с; е) – вид границы раздела при наличии волны с азимутальным числом 3, $f_r=5.61$ об/с

Результаты обработки скоростной видеосъемки представлены на рис.3, экспериментальные точки для разных значений скорости вращения полости представлены как усредняющие их линии при одном относительном объеме, точками обозначаются результаты для скорости вращения 5.711 об/с. Значение дифференциальной скорости вращения увеличивается по абсолютному значению с уменьшением скорости вращения полости и оказываются соответственно равны $\Delta f = -0.025, -0.033, -0.068, -0.105$ об/с. Направление вращения полости совпадает с осью φ , нулевая координата совпадает с направлением действия вектора силы тяжести. Наблюдается увеличение амплитуды колебаний столба легкой жидкости с понижением скорости вращения полости и соответствующим ростом интенсивности отставания границы раздела.

На рис.3 для результатов, обозначенных точками, видно, что существуют области, где наблюдается разброс экспериментальных точек по значению амплитуды при одной и той же

угловой координате. Причиной этому является преломление лазерного ножа на цилиндрической стенке кюветы, существование областей тени на границе раздела и засветка частиц на краю этих областей.

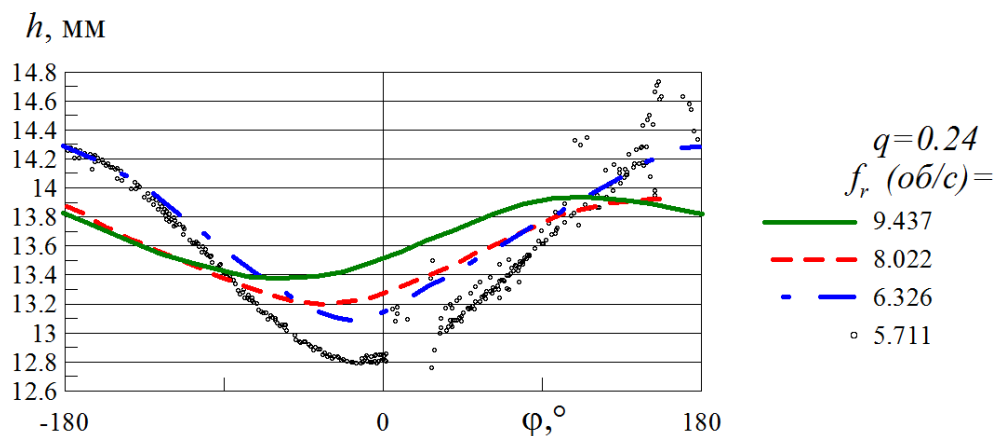


Рис. 3. Профиль границы раздела в зависимости от угловой координаты

Поверхность легкой жидкости, совершающая колебания, является генератором осредненных течений подобно легкому цилиндрическому телу в горизонтальной вращающейся полости [1]. В пределе высокой безразмерной частоты $\omega = 2\pi f_r R_i^2 / \nu$, когда вязкость жидкости не учитывается, колебания цилиндрического тела и колебания цилиндрического столба жидкости описываются одинаковыми уравнениями и имеют одинаковый вид. В работе [2] теоретически найдено выражение амплитуды колебаний легкого цилиндрического тела в невязкой жидкости

$$b_s = \frac{1}{2} \Gamma R_i (1 - \rho)(1 - q) \quad (1)$$

На рис. 4 представлено сравнение теоретической зависимости (1) (сплошная кривая) с полученными экспериментальными точками. Точки для относительного объема $q = 0.24, 0.46$ удовлетворительно согласуются с теоретической кривой, тогда как при относительном объеме $q=0.76$ точки отклоняются от этой зависимости. При $q>0.70$, при сравнительно низкой скорости вращения полости, наблюдалось натекание легкой жидкости на торцы полости. Это означает выраженное трёхмерное течение и существенное взаимодействие с торцами. При расчёте формулы (1) в задаче о колебаниях цилиндрического тела во вращающейся горизонтальной полости обмен моментом импульса с торцевыми стенками и осевое течение не учитывались.

Согласие эксперимента и теории указывает на то, что столб лёгкой жидкости совершает двумерные инерционные колебания, амплитуда которых определяется разностью плотностей жидкостей.

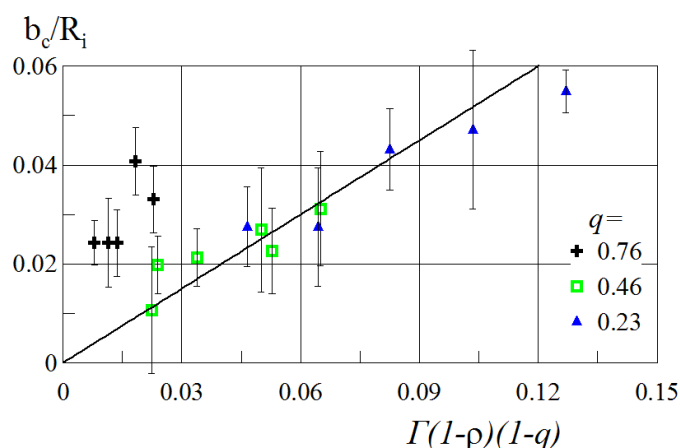


Рис. 4. Зависимость безразмерной амплитуды колебаний границы раздела (индустриальное масло и водоглицериновый раствор) от безразмерного комплекса, кривая построена по формуле (1)

При критическом значении f_r наблюдается перестройка системы, выражающаяся в появлении на границе раздела двумерной бегущей азимутальной волны (рис. 2. в, е). Гребни волны вытянуты параллельно оси вращения. Наблюдались волны с азимутальными числами от 2 до 5, изменяющимися дискретно. Профиль границы раздела при $m = 3$ показан на рис. 5. Направление распространения волны в системе отсчета полости обратно направлению вращения кюветы (в сторону понижения φ), т.е. фазовая скорость волны носит запаздывающий характер.

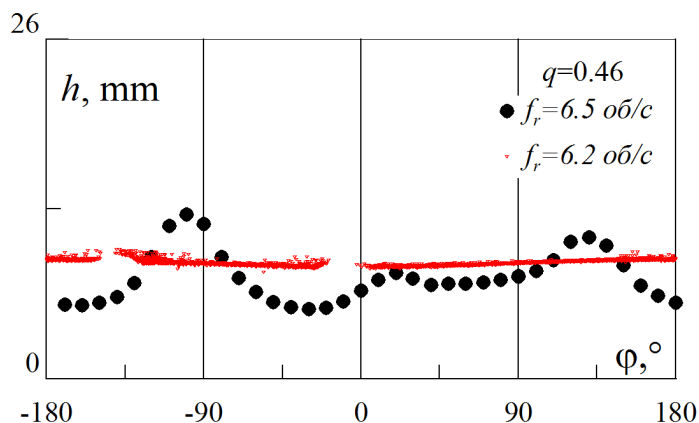


Рис. 5. Профиль границы раздела в зависимости от угловой координаты, маленькими точками обозначены экспериментальные данные в допороговой области $f_r=6.2$ об/с

Амплитуда мгновенного надкритического профиля (рис. 5) изменяется вдоль φ . Наблюдение движения профиля относительно полости обнаруживает, что он прогибается вниз в окрестности ноля под действием силы тяжести. Волновая неустойчивость,

возникающая на границе раздела жидкостей при критическом значении f_r , является суммой нескольких возмущений.

Заключение. Экспериментально измерена амплитуда колебаний столба внутренней жидкости в системе несмешивающихся жидкостей в горизонтальной цилиндрической полости при вращении в поле силы тяжести. Показано, что амплитуда возрастает с уменьшением скорости вращения кюветы. Получено удовлетворительное согласие экспериментальных результатов измерения амплитуды с теорией. Механизм возбуждения инерционных колебаний и генерации дифференциального вращения столба легкой жидкости аналогичен механизму возбуждения колебаний и движения легкого цилиндрического тела.

Работа выполнена в рамках задания Минобрнауки РФ 2014/372 (проект 2176) при поддержке Программы стратегического развития ПГГПУ (проект 029-Ф).

Список литературы

1. Козлов В.Г., Козлов Н.В. Вибрационный гидродинамический волчок // Докл. РАН. 2007. Т. 415, № 6. С. 759–762.
2. Козлов Н.В., Козлова А.Н., Пичкалев С.В. Динамика двухжидкостной системы во вращающемся горизонтальном цилиндре // Конвективные течения... Выпуск 6 /Пермь: ПГГПУ, 2013. С. 168-184
3. Любимов Д. В., Любимова Т. П., Черепанов А. А. Динамика поверхностей раздела в вибрационных полях. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 216 с.
4. Dore D. On mass transport Induced by interfacial oscillations at a single frequency // Proc. Camb. Phil Soc. - 1973. - V. 74. - P. 333-347.
5. Kozlov, N., Salnikova, A., Stambouli, M. Vibrational dynamics of two immiscible liquids under rotation // 61st Intern. Astronautical Congress 2010 (IAC 2010). Curran Associates, Inc. 2011. V. 4. P. 2886-2892.
6. Kozlov N., Salnikova A., Subbotin S., Stambouli M. Wave instability in a rotating liquid column // 63rd Intern. Astronautical Congress 2012 (IAC 2012). Curran Associates, Inc. 2013. V. 1. P. 717–723.

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.