

На правах рукописи



Власова Ольга Андреевна

**ИЗУЧЕНИЕ ПОДЪЕМНЫХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ТВЕРДЫЕ
ТЕЛА В ЖИДКОСТИ ПРИ ВИБРАЦИЯХ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2018

Работа выполнена на кафедре общей и экспериментальной физики ФГБОУ ВО «Пермский государственный гуманитарно-педагогического университет».

Научный руководитель: **Козлов Виктор Геннадьевич**, доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Катасонов Михаил Михайлович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН, г. Новосибирск.

Брацун Дмитрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной физики ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита состоится **18 октября 2018 г.** в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент

 / А.Л. Зуев

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования.

В настоящее время большое внимание исследователей уделяется задачам вибрационной гидромеханики, в которых изучается влияния осциллирующих силовых полей на неоднородные по плотности гидродинамические системы. Интерес вызывает динамика свободных фазовых включений в жидкости, а также осредненные силы, действующие на включения, в осциллирующих силовых полях. Актуальность данного направления определяется прикладным потенциалом вибрационных методов управления фазовыми включениями, в частности, в задачах очистки жидкости и управления многофазными системами. Вибрационное управление включениями в жидкости является перспективным подходом к оптимизации технологических процессов.

Осредненные силы вибрационной природы, действующие на твердые тела при высокочастотном вибрационном воздействии, изучались в серии экспериментальных и теоретических исследований. Рассмотрена динамика симметричных тел (сферической или цилиндрической формы) разной плотности при их колебаниях вблизи твердой границы или на расстоянии от нее, в случае, когда гидродинамическая система совершает поступательные или поступательно-вращательные колебания. Получены условия, при которых тяжелые тела, совершающие колебания на расстоянии от стенки, всплывают и притягиваются к ней, а легкие тонут под действием вибраций в поле силы тяжести. Отметим, что сила притяжения возрастает с уменьшением расстояния между телом и границей и проявляется только на расстоянии, сравнимом с характерным размером тела. Показано, что тело совершает колебания в непосредственной близости от стенки, сила вибрационного взаимодействия тела со стенкой меняет знак, отталкивая тело от последней. Сила отталкивания проявляется на расстоянии сравнимом с толщиной пограничного слоя Стокса.

На данный момент существует ряд актуальных нерассмотренных проблем. Неисследованной остается задача о влиянии поступательных вибраций на тела сложной не осесимметричной формы (например, в виде пластины) в жидкости вблизи границы полости. Новым и быстро развивающимся направлением является вибрационная динамика твердых тел во вращающихся полостях. Однако исследования в этой области ограничены случаем «легких» тел, плотность которых меньше плотности жидкости.

Изучение вибрационной динамики тел сложной формы при поступательных вибрациях, а также вибрационных сил, действующих на «тяжелые» тела во вращающихся системах, наряду с прикладным аспектом является важным для развития теории «вибрационной гидромеханики».

Целью диссертационной работы является изучение подъемной силы, действующей на твердые тела различной формы в заполненных жидкостью полостях, совершающих колебательное движение.

Задачи исследования:

- экспериментальное исследование динамики легкого (тяжелого) плоского тела, находящегося вблизи границы прямоугольной полости с жидкостью, совершающей продольные поступательные колебания;

- построение теоретической модели генерации вибрационной подъемной силы, действующей на колеблющееся в жидкости плоское тело;
- изучение динамики тяжелого цилиндрического тела в горизонтальной цилиндрической полости с жидкостью при ее равномерном и неравномерном вращении.

Научная новизна. Впервые экспериментально и теоретически рассмотрена новая задача об осредненной подъемной силе, действующей на плоское твердое тело, совершающее тангенциальные к границе колебания в прямоугольной полости с жидкостью. Обнаружено, что при отрывном режиме обтекания тела важную роль играет относительная амплитуда колебаний тела. В работе рассмотрен новый вибрационный способ управления тяжелыми телами во вращающихся полостях с жидкостью, основанный на модуляции скорости вращения. Обнаружено, что помимо азимутальных колебаний вдоль границы полости тело совершает синфазные вращательные колебания вокруг своей оси. Показано, что в этом случае значение коэффициента подъемной силы оказывается намного больше, чем в случае, когда тело совершает поступательные колебания вблизи границы.

Теоретическая и практическая значимость работы. Выполненные экспериментальные исследования важны для развития теории вибрационной гидромеханики гетерогенных систем, для более глубокого понимания осредненных явлений в многофазных системах в осциллирующих силовых полях. Особое значение результаты исследования могут иметь для условий пониженной гравитации (для космических технологий). На основе результатов исследования можно рекомендовать использование обнаруженного явления – отталкивание твердого включения от границы, совершающей тангенциальные колебания – для управления включениями, расположенными вблизи границы полости, в различных технологических процессах. Большой интерес (с фундаментальной и прикладной точки зрения) представляет выяснение причины возникновения новой дополнительной подъемной силы, действующей на тело в неравномерно вращающейся полости с жидкостью.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач используются хорошо апробированные экспериментальные методики, современное экспериментальное оборудование и технологии для контроля и последующей обработки экспериментальных данных. Исследование поведения тела осуществляется при помощи скоростной видеокамеры. Обработка полученных кадров в специализированных программах позволяет детально изучить изменение основных характеристик движения тела со временем. Подъемная сила, действующая на плоское тело в прямоугольной полости с жидкостью при вибрациях, измеряется методом подвеса тела в поле силы тяжести, апробированным в экспериментальных работах (Щипицын и др., 2014, Кузаев и др. 2005). Аналогичным образом подъемная сила измеряется в случае неравномерного вращения цилиндрической полости с цилиндрическим телом и жидкостью внутри, только в качестве статической силы, уравнивающей подъемную силу, выступает центробежная сила. Структуры течения в системе изучаются с применением PIV-метода, который отличается высокой

эффективностью и широко используется в гидродинамических исследованиях. Теоретические модели построены в приближении высоких частот и малых амплитуд вибраций, т. е. рассматриваются колебания тела в невязкой жидкости.

Положения, выносимые на защиту.

- результаты экспериментального изучения вибрационной динамики легкой (тяжелой) пластины, совершающей тангенциальные колебания вблизи границы прямоугольной полости с жидкостью под действием осциллирующей силы инерции, выполненного в широком диапазоне безразмерных частот:

- ✓ изучение вибрационной подъемной силы, действующей вблизи границы полости на тела разной относительной плотности;

- ✓ исследование динамики тела, совершающего колебания, при помощи скоростной видеосъемки;

- теоретическое описание вибрационной подъемной силы, действующей на пластину в заполненной жидкостью полости, совершающей поступательные колебания, в приближении высоких частот и малых амплитуд вибраций.

- результаты экспериментального изучения динамики тяжелого цилиндрического тела, помещенного в заполненную вязкой жидкостью горизонтальную цилиндрическую полость, при равномерном и неравномерном вращении последней:

- ✓ основные режимы движения тела при равномерном вращении кюветы вокруг горизонтальной оси;

- ✓ исследование осредненной подъемной силы, действующей на цилиндрическое тело в центрифугированном состоянии, при модуляции скорости вращения полости;

- ✓ исследование динамики тела при помощи скоростной видеосъемки.

Достоверность результатов обеспечивается использованием апробированных современных методик измерения и обработки данных, детальным изучением, комплексным экспериментальным и теоретическим рассмотрением проблемы и сравнением с данными других авторов.

Апробация результатов. Результаты исследования были представлены на следующих конференциях: XVIII и XX Зимние школы по механике сплошных сред (Пермь, 2013 г., 2017 г.); Международная конференция «Потоки и структуры в жидкостях» (Санкт-Петербург, 2013 г.); Международная конференция «Пермские гидродинамические научные чтения» (Пермь, 2013 г., 2014 г.); XXI и XXII Международные конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» (Москва, 2014 г., 2016 г.); XLII Международная Летняя школа-конференция «Актуальные проблемы механики» (Санкт-Петербург, 2014 г.); V международная научная школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (Москва, 2014 г., 2016 г.); XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015 г.); Всероссийская конференция с участием зарубежных ученых «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения», (Барнаул, 2017 г.); Международный симпозиум «Неравновесные процессы в сплошных средах» (Пермь, 2017 г.). Результаты исследований также были представлены на

Пермском гидродинамическом семинаре (Пермский государственный университет, Пермь, 2014 г., 2018 г.). Результаты диссертационного исследования получены при поддержке РФФИ (гранты 13-01-00675, 16-31-00201), РНФ (грант 14-11-00476), грантов поддержки научных школ НШ-4022.2014.1 (2014-2015), НШ-9176.2016.1 (2016-2017).

Публикации. Полученные результаты опубликованы в 23 работах, включая 5 статей [1-5] в журналах из списка ВАК (индексированы в WOS), 6 статей в сборниках научных статей [6-9] и трудах конференций [10-12] (индексированы в РИНЦ) и 11 тезисов докладов.

Личный вклад. Экспериментальные исследования и обработка результатов выполнены диссертантом, обсуждение и теоретический анализ осуществлялись совместно с научным руководителем и соавторами.

Содержание работы

Основной текст работы состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 149 страниц текста, включающих в себя 83 рисунка и список литературы из 117 источников.

Во **введении** представлен обзор литературы по теме диссертации, обозначены цель и задачи исследования, ее новизна, научная значимость, а также приведено краткое содержание диссертации.

Первая глава включает в себя результаты экспериментального исследования динамики тела в форме пластины заданной толщины в полости с жидкостью, совершающей горизонтальные поступательные колебания.

В п.1.1 приведено описание экспериментальной установки и методики исследований. Эксперименты проводятся в прямоугольной кювете, изготовленной из оргстекла. Кювета с помещенным в нее телом заполняется водоглицериновым раствором и устанавливается на столик механического вибростенда, который задает горизонтальные поступательные колебания по закону $X = b \cos \Omega t$. Частота колебаний $f = \Omega / (2\pi)$ варьируется в интервале от 2 до 25 Гц (точность измерения частоты составляет 0.1 Гц), амплитуда колебаний b – в интервале от 1 до 50 мм (точность измерения – не ниже 0.1 мм). Вязкость рабочей жидкости измеряется при помощи вискозиметра типа ВПЖ (относительная погрешность не превышает 1%), плотность – ареометром с точностью 0.01 г/см³. Эксперименты проводятся при изменении амплитуды вибраций, вязкости жидкости, а также характерных размеров тела и его геометрии (острый либо закругленный край). Наблюдения за поведением тела, а также фото- и видеорегистрация проводятся в обычном и стробоскопическом освещении. Методика проведения опытов следующая. При заданной амплитуде вибраций b плавно повышается частота f . Определяется пороговая частота отрыва одного края тела от потолка (дна) полости и пороговая частота отрыва всего тела. При последующем понижении частоты вибраций определяется порог возвращения одного края тела к верхней (нижней) границе полости и пороговая частота возвращения всего тела, когда зазор между телом и полотком (дном) кюветы исчезает.

В п. 1.2 представлены результаты изучения динамики легкого тела (относительная плотность $\rho \equiv \rho_s / \rho_L = 0.05 - 0.55$) в полости ($16.0 \times 4.0 \times 6.7$ см³) с жидкостью (вязкость $\nu = 0.01 - 0.34$ Ст) при вибрациях. В отсутствие колебаний кюветы легкое тело под действием силы Архимеда и силы тяжести прижимается к потолку кюветы. При вибрациях тело совершает колебания в полости под действием осциллирующей силы инерции. Обнаружено, что на тело, колеблющееся вблизи границы полости, действует сила, направленная перпендикулярно стенке. При повышении частоты вибраций (при заданной амплитуде) по достижении некоторой критической частоты тело отталкивается от границы (рис. 1). Сначала отрывается один торец тела (рис. 1,а), дальнейшее повышение интенсивности вибраций приводит к полному отрыву тела: оно переходит в «подвешенное состояние», продолжая совершать колебания на некотором расстоянии от стенки (рис. 1,б). При частичном отрыве тела может приподниматься как его правый, так и левый край. С повышением вибрационного воздействия увеличивается расстояние между телом и стенкой. Вне зависимости от формы края все переходы тела происходят пороговым образом. Характерный вид кривых пороговых переходов представлен на рис. 2. Темные точки 1 соответствуют частичному отрыву тела от потолка полости, темные точки 2 – отрыву всего тела; светлые точки 1 – частичному возвращению тела к потолку, светлые точки 2 – возвращению всего тела к потолку. Критическое значение частоты вибраций уменьшается с увеличением амплитуды. В переходах наблюдается гистерезис, область гистерезиса показана заливкой на рис. 2. Обнаружено, что для тел с острыми краями характерны нерегулярные колебания, поэтому основное внимание уделялось телам с закругленным краем.

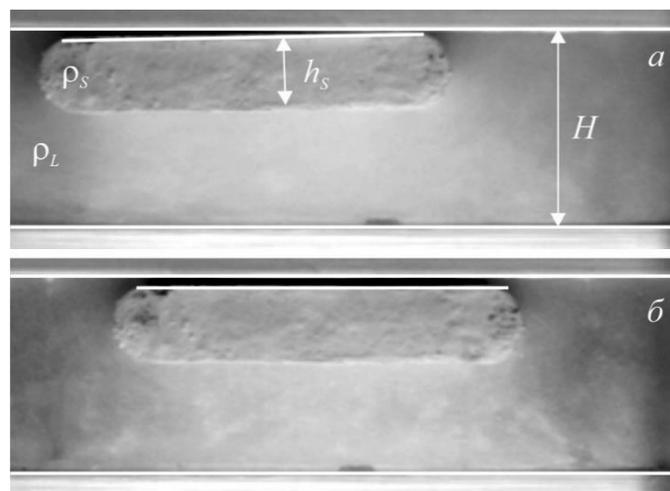


Рис. 1. Положение тела $h_s = 1.61$ см при вибрациях различной интенсивности; $b = 1.20$ см, $f = 4.7$ (а) и 8.8 Гц (б)

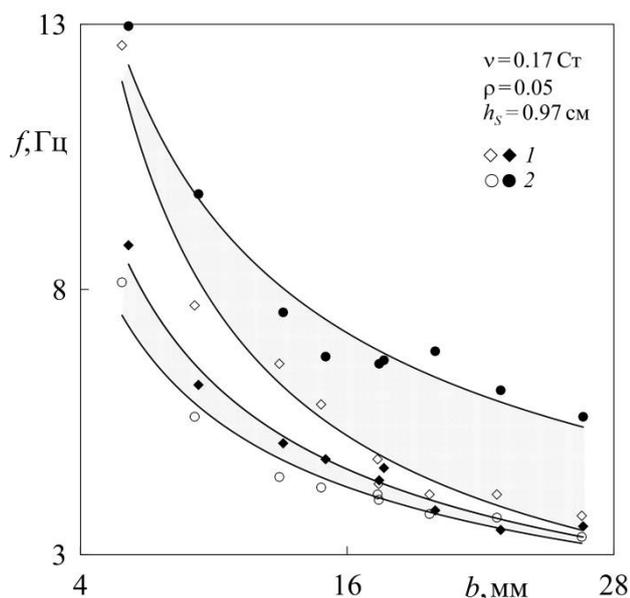


Рис. 2. Пороговые переходы прямоугольного тела на плоскости b, f

возвращению всего тела к потолку. Критическое значение частоты вибраций уменьшается с увеличением амплитуды. В переходах наблюдается гистерезис, область гистерезиса показана заливкой на рис. 2. Обнаружено, что для тел с острыми краями характерны нерегулярные колебания, поэтому основное внимание уделялось телам с закругленным краем.

Характер колебаний тела изучается при помощи высокоскоростной видеокамеры. Показано, что после отрыва колебания тела происходят

практически в одной фазе с полостью. Обнаружено, что одновременно с поступательными колебаниями плоское тело совершает угловые качания малой амплитуды. Траектории движения краев тела показаны на рис. 3. В качестве единицы измерения величины зазора между телом и стенкой полости выбрана толщина вязкого пограничного слоя $\delta = \sqrt{2\nu/\Omega}$, единицей измерения смещения тела вдоль оси вибраций служит амплитуда колебаний полости b . Эллиптическая форма траектории движения краев тела свидетельствует о сдвиге фаз между продольными и угловыми колебаниями тела.

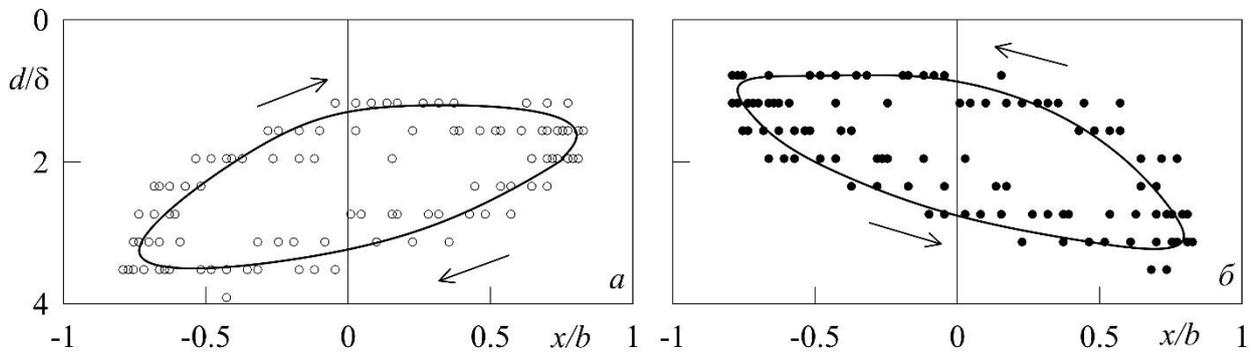


Рис. 3. Траектория движения левого (а) и правого (б) края тела толщиной $h_s = 1.61$ см на плоскости безразмерных параметров; $f = 14.6$ Гц

При движении тела справа налево от границы удаляется левый край (рис. 3,а), при движении слева направо – правый (рис. 3,б). В ходе колебаний зазор между правым (левым) краем тела и потолком изменяется в интервале $0.5 \leq d/\delta \leq 3.5$. Удаление тела от стенки полости сравнимо с δ , что согласуется с результатами экспериментов со сферическими и цилиндрическими телами в (Щипицын и др., 2014, Кузаев и др, 2008).

В рассматриваемой задаче управляющими являются безразмерные параметры ω, W . Здесь $W \equiv b^2 \Omega^2 / gh_s$ – вибрационный аналог числа Фруда, характеризующий отношение вибрационной подъемной силы к силе тяжести для тела заданной плотности ρ . Безразмерная частота $\omega = \Omega h_s^2 / \nu$ характеризует отношение размера тела h_s к толщине пограничного слоя Стокса. Результаты экспериментов с жидкостями разной вязкости удовлетворительно согласуются на плоскости ω, W . Экспериментальное значение W зависит от безразмерной частоты: с увеличением ω пороговое значение W понижается.

В п. 1.3 представлены результаты экспериментов с тяжелым телом ($\rho = 2.06 - 2.19$) в прямоугольной полости ($14.10 \times 2.05 \times 3.55$ см³), высота которой варьировалась, т.е. изменялась толщина слоя жидкости над телом h_L . Опыты проводились с жидкостями различной вязкости ($\nu = 0.05 - 1.29$ Ст) при разных значениях относительной толщины тела $\xi \equiv h_s / h_L = 0.80, 1.02$ и 1.42 . Показано, что динамика тяжелого тела аналогична динамике легкого, но в отличие от легкого тяжелое тело совершает колебания с меньшей амплитудой угловых качаний и в противофазе с колебаниями кюветы. В условиях выполненных экспериментов зазор изменяется в интервале $d = \delta - 2\delta$.

Результаты экспериментов с жидкостями различной вязкости при разных значениях относительной толщины тела на плоскости управляющих безразмерных параметров ω, W согласуются между собой.

В п.1.4 рассматривается вибрационная динамика более плотного тела ($\rho = 3.0 - 6.5$) в прямоугольной полости ($22.0 \times 2.0 \times 3.4 \text{ см}^3$) с жидкостью ($\nu = 0.11 - 1.21 \text{ Ст}$). Увеличение относительной плотности тела приводит к увеличению амплитуды его инерционных колебаний относительно полости. При этом поведение тела аналогично случаю менее плотных тел: тело совершает одновременно поступательные колебания и угловые качания (рис. 4).

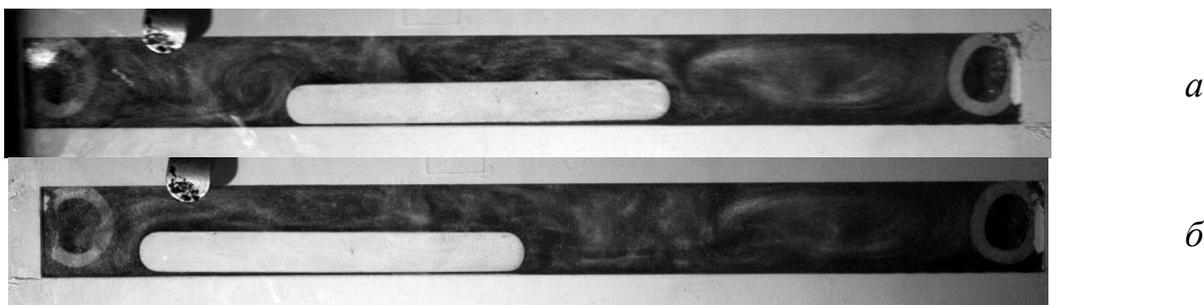


Рис. 4. Крайние положения полости при вибрациях (*а* – левое, *б* – правое); $f = 13.6 \text{ Гц}$, $\rho = 6.4$; тело находится в «подвешенном» состоянии

Показано, что, как и в опытах с телами меньшей ρ , в настоящих экспериментах значение параметра W зависит от безразмерной частоты: с увеличением частоты ω параметр W уменьшается (рис. 5, *а*). Рассогласование точек на плоскости безразмерных параметров говорит о том, что в случае больших амплитуд колебаний тяжелого тела безразмерная частота ω перестает быть управляющим параметром.

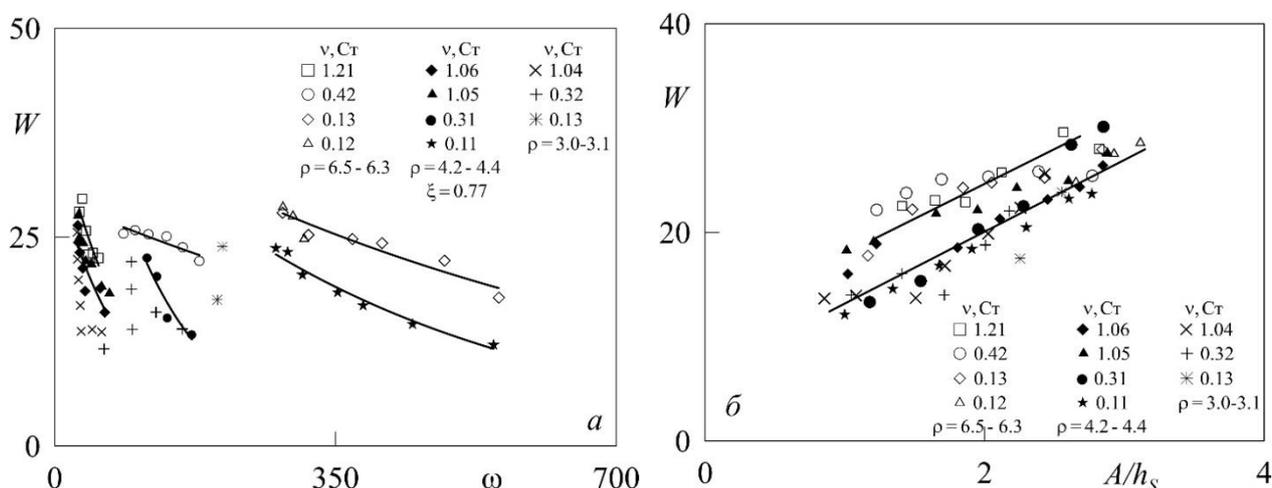


Рис. 5 Пороговые переходы частичного возвращения тела на плоскости безразмерных параметров ω, W и параметров $A/h_s, W$

Обнаружено, что в случае массивного плоского тела, колеблющегося в жидкости вблизи твердой границы, определяющим становится амплитуда его колебаний A/h_s , а не безразмерная частота ω , как это было для тел меньшей

относительной плотности (рис. 5,б). Здесь A/h_s – амплитуда колебаний тела относительно полости, измеренная в единицах его толщины. Видно, что в условиях проведенных экспериментов тело совершает колебания с амплитудой, значительно превышающей его характерный размер. Известно, что при таких амплитудах колебаний тела характер его обтекания становится отрывным. Добавленный в жидкость визуализатор прорисовывает вихревые структуры вблизи колеблющегося тела (рис. 4).

Во второй главе в п. 2.1 дано теоретическое описание вибрационной подъемной силы, действующей на прямоугольное тело толщиной h_s и плотностью ρ_s , помещенное в кювету с жидкостью плотностью ρ_L ($\rho_L \neq \rho_s$). Кювета прямоугольной формы совершает высокочастотные колебания малой амплитуды вдоль горизонтальной оси x по закону $\mathbf{r} = b \cos \Omega \mathbf{n}$ (рис. 6). Тело свободно движется в полости и совершает тангенциальные колебания вблизи стенки полости, при этом оно обтекается потоком невязкой жидкости только с одной стороны. Будем считать, что толщина полости H много меньше ее длины и много меньше длины тела. В этом приближении задача рассматривается в двумерной постановке, влиянием торцов тела пренебрегаем. При вибрациях полости тело и жидкость совершают поршневые колебания в противофазе. В силу обращения в ноль расхода жидкости (канал закрыт), скорость движения тела и жидкости связаны соотношением $v_s = -\xi v_L$, здесь $\xi = h_s/h_L$ – относительная толщина тела. На границе тело–жидкость появляется тангенциальный скачок скорости $\Delta v \equiv v_s - v_L$, который приводит к появлению среднего по времени перепада давления, отталкивающего тело от стенки. Квазиравновесие тела в поле силы тяжести определяется условием, когда сумма всех сил в проекции на ось y равна нулю, т. е. осредненная по периоду вибрационная подъемная сила уравнивает вес тела в жидкости. При этом тело совершает колебания вблизи границы, не прикасаясь к ней. Условие квазиравновесия прямоугольного тела вблизи горизонтальной границы полости, заполненной жидкостью и совершающей высокочастотные продольные вибрации определяется выражением $W = 4(\rho + \xi)^2 / (1 + \xi)^2 |\rho - 1|$. Здесь $W \equiv b^2 \Omega^2 / gh_s$ – безразмерный вибрационный параметр. Из уравнения видно, что порог отталкивания тела от стенки зависит не только от его относительной плотности, но и от относительной толщины. В условиях сделанных предположений амплитуда колебаний тела A (в системе отсчета полости) связана с амплитудой вибраций полости b соотношением $A/b = |\rho - 1| / (\rho + \xi)$.

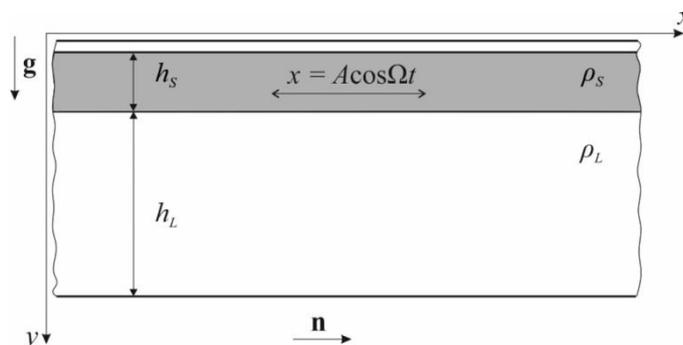


Рис. 6. Прямоугольное тело в прямоугольной полости с жидкостью при поступательных колебаниях последней

Тело свободно движется в полости и совершает тангенциальные колебания вблизи стенки полости, при этом оно обтекается потоком невязкой жидкости только с одной стороны. Будем считать, что толщина полости H много меньше ее длины и много меньше длины тела. В этом приближении задача рассматривается в двумерной постановке, влиянием торцов тела пренебрегаем. При вибрациях полости тело и жидкость совершают поршневые колебания в противофазе. В силу обращения в ноль расхода жидкости (канал закрыт), скорость движения тела и жидкости связаны соотношением $v_s = -\xi v_L$, здесь $\xi = h_s/h_L$ – относительная толщина тела. На границе тело–жидкость появляется тангенциальный скачок скорости $\Delta v \equiv v_s - v_L$, который приводит к появлению среднего по времени перепада давления, отталкивающего тело от стенки. Квазиравновесие тела в поле силы тяжести определяется условием, когда сумма всех сил в проекции на ось y равна нулю, т. е. осредненная по периоду вибрационная подъемная сила уравнивает вес тела в жидкости. При этом тело совершает колебания вблизи границы, не прикасаясь к ней. Условие квазиравновесия прямоугольного тела вблизи горизонтальной границы полости, заполненной жидкостью и совершающей высокочастотные продольные вибрации определяется выражением $W = 4(\rho + \xi)^2 / (1 + \xi)^2 |\rho - 1|$. Здесь $W \equiv b^2 \Omega^2 / gh_s$ – безразмерный вибрационный параметр. Из уравнения видно, что порог отталкивания тела от стенки зависит не только от его относительной плотности, но и от относительной толщины. В условиях сделанных предположений амплитуда колебаний тела A (в системе отсчета полости) связана с амплитудой вибраций полости b соотношением $A/b = |\rho - 1| / (\rho + \xi)$.

В п.2.2 проводится сравнение экспериментальных результатов с теоретическими расчетами. Безразмерная амплитуда колебаний тела в эксперименте A_{exp}/b оказывается несколько меньше теоретического значения A_{theory}/b , полученного в приближении невязкого характера обтекания тела. С увеличением ρ экспериментальное значение относительной амплитуды колебаний тела, приближается к теоретическому.

В работах, посвященных изучению действия подъемной силы на твердые включения в жидкости, принято говорить о коэффициенте подъемной силы C_L , который связан с параметром W соотношением $C_L = (\rho - 1)W^{-1}$. В пороге отрыва коэффициент подъемной силы C_L в случае тела, совершающего колебания в приближении малых амплитуд вибраций и высоких частот, определяется выражением $C_L = (\rho - 1)^2 (\xi + 1)^2 / 4(\rho + \xi)^2$. Результаты экспериментов с легкими (тяжелыми) телами в жидкостях различной вязкости удовлетворительно согласуются на плоскости безразмерных параметров ω, C_L (рис. 7). В условиях наших экспериментов порогу вибрационного подвеса тела соответствует значение коэффициента $C_L = 1.01$ для легкого тела, $C_L = 0.11$ и 0.14 для тяжелого (штриховые линии на рис. 7). Значение C_L , рассчитанное по порогу удержания тела, растет с увеличением ω , но идет ниже расчетного. Для экспериментов с телом $\rho \sim 2$ можно предположить, что несовпадение экспериментального (сплошная кривая) и расчетного (штриховая) порогов связано с тем, что теоретическая модель построена в высокочастотном приближении, а экспериментальные точки оказались в области низких безразмерных частот.

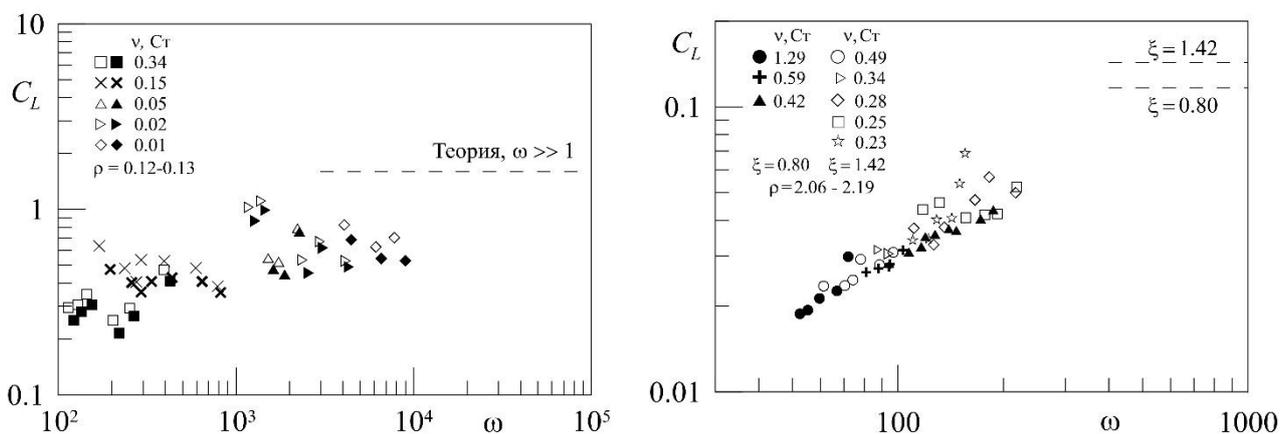


Рис. 7. Границы порогов удержания легкого (слева) и тяжелого (справа) тела

Следует отметить, что в теории не учитывается вязкое взаимодействие колеблющегося тела с границей. В экспериментах с легкими телами отличие коэффициента подъемной силы отталкивания от расчетного значения предположительно объясняется тем, что амплитуда колебаний тела в результате вязкого взаимодействия меньше расчетного значения. С учетом реальной амплитуды колебаний тела теоретические и экспериментальные результаты согласуются.

В случае тяжелого тела с относительной плотностью $\rho > 3$, совершающего колебания с большой амплитудой, относительная толщина тела имеет значение $\xi = 0.80$. Для данных параметров расчетная критическая величина коэффициента подъемной силы, когда тело ($\rho = 3.0 - 6.4$) удерживается над дном полости, принимает значения $0.22 - 0.45$. На рис.8 представлен график для коэффициента вибрационной подъемной силы C_L от амплитуды колебаний тела A , измеренной в единицах толщины тела h_s .

В эксперименте тело совершает колебания с амплитудой, превосходящей собственный размер. Результаты, полученные в экспериментах с телами заданной плотности в жидкостях разной вязкости удовлетворительно, согласуются между собой. Пороговые экспериментальные значения коэффициента подъемной силы приближаются к теоретическому (штриховая линия) с уменьшением A/h_s . Для сравнения на рис. 8 приведены экспериментальные точки, полученные в опытах с алюминиевым телом плотностью $\rho \sim 2$, $\xi = 0.80$. Экспериментальные точки находятся ниже, чем для более плотных тел, при этом они находятся в области меньших безразмерных амплитуд и плохо согласуются между собой. Таким образом, если тело совершает колебания с малой амплитудой, то существенным оказывается безразмерная частота ω , при больших амплитудах колебаний управляющей является амплитуда колебаний A/h_s .

Третья глава посвящена экспериментальному изучению поведения тяжелого цилиндрического тела в горизонтальной цилиндрической полости (радиусом $R = 3.0$ см и длиной $L = 7.4$ см), заполненной вязкой жидкостью, вращающейся с угловой скоростью $\Omega = \Omega_{rot}(1 + \varepsilon \cos \Omega_{lib} t)$, здесь Ω_{lib} – частота модуляции скорости, Ω_{rot} – средняя скорость вращения полости, ε – амплитуда модуляции. Рассматривается динамика тела при равномерном вращении полости ($\varepsilon = 0$) и при модуляции скорости вращения ($\varepsilon \neq 0$).

В п.3.1 дано описание экспериментальной установки и методики исследования. Опыты проводятся в цилиндрической полости 1 с цилиндром 2 внутри (рис. 9). Полость заполняется жидкостью: водным раствором глицерина вязкостью $\nu = 0.10 - 0.59$ Ст и плотностью $\rho_L = 1.17 - 1.21$ г/см³ или

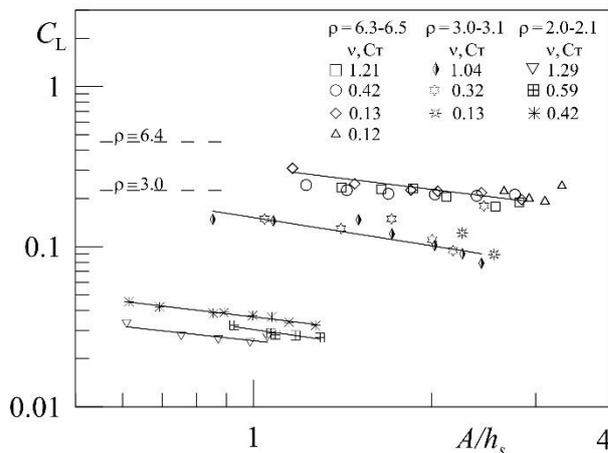


Рис. 8. Зависимость коэффициента подъемной силы от безразмерной амплитуды колебаний тела

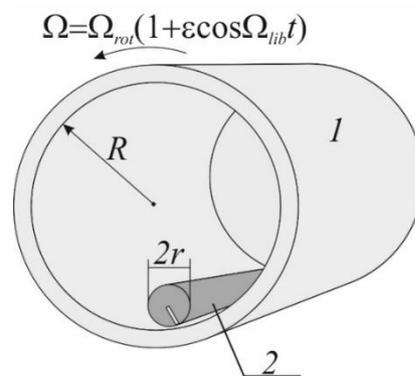


Рис. 9. Схема кюветы

индустриальным маслом ($\nu = 0.90$ Ст и $\rho_L = 0.87$ г/см³). Относительная плотность тела составляет $\rho \equiv \rho_s / \rho_L = 2.51$ для алюминия и варьируется в диапазоне 1.02 – 1.36 для тела из плексигласа. Наблюдение за динамикой тела осуществляется через передний торец полости. На передний торец тела нанесена метка, которая позволяет следить за вращением тела вокруг собственной оси.

В п.3.2 приведены результаты исследования динамики алюминиевого цилиндра ($r = 0.47$ см, $l = 6.0$ см) в жидкости ($\nu = 0.59$ Ст) при **равномерном** вращении кюветы. Обнаружено несколько режимов движения тела в зависимости от скорости вращения полости (рис. 10). На графике точкой (●) показано начальное положение тела в нижней части полости ($\Omega = 0$), другие символы отмечают среднее, характерное для данной скорости, азимутальное положение тела, интервалы – предельное отклонение от среднего положения.

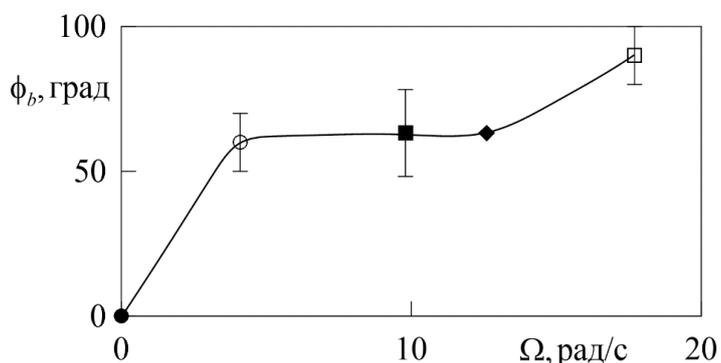


Рис. 10. Изменение средней азимутальной координаты тела ϕ_b с повышением Ω

При плавном увеличении Ω тело увлекается движущейся стенкой полости, его азимутальная координата увеличивается с Ω . Это происходит до некоторого критического (в условиях нашего эксперимента) значения угла, $\phi_b \approx 60^\circ$, после чего среднее азимутальное положение тела практически не изменяется с увеличением Ω . Оставаясь в среднем вблизи значения $\phi_b \approx 60^\circ$, цилиндр последовательно сменяет режимы движения с повышением Ω : от скольжения вдоль границы (рис. 11) он переходит к «шагам» (рис. 12, а, б) и далее к стационарному подвесу в лабораторной системе отсчета (точка ◆ на рис. 10). При дальнейшем увеличении Ω тело, находясь в «подвешенном состоянии» на некотором расстоянии от стенки полости, поднимается вверх, смещаясь вдоль азимутальной координаты. Тело сохраняет устойчивое положение до значения $\phi_b \approx 90^\circ$. При $\phi_b \approx 90^\circ$ стационарное «подвешенное» состояние тела теряет устойчивость: тело начинает совершать колебания, напоминающие прецессию (рис. 12, в, г). С увеличением скорости вращения полости увеличивается амплитуда колебаний тела, но его среднее азимутальное положение остается неизменным. При дальнейшем повышении Ω тело увлекается потоком, прижимается к стенке и совершает вращение вместе с полостью.

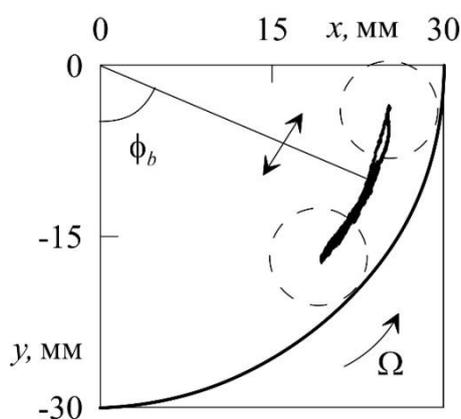


Рис. 11. Траектория движения центра тела в координатах полости; $\Omega = 4.1$ рад/с

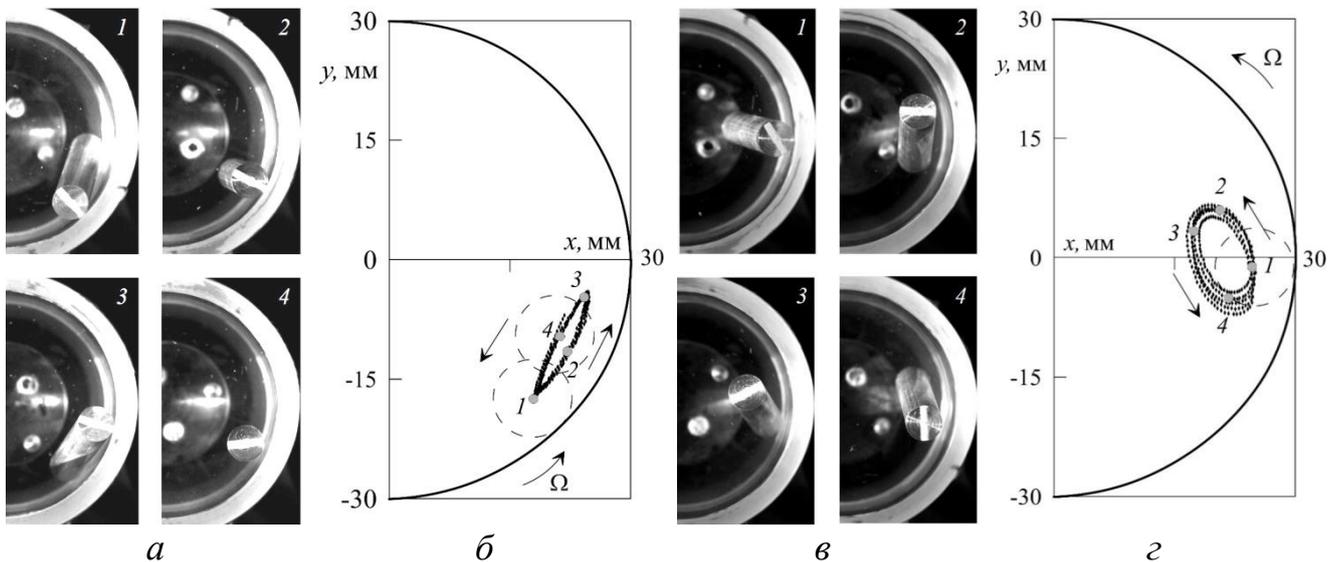


Рис. 12. Последовательность характерных положений тела при $\Omega = 9.8$ рад/с (а) и $\Omega = 17.8$ рад/с (в). Траектория движения центра торца цилиндра в лабораторной системе отсчета (б,г)

Изучена структура течения при различных состояниях тела с помощью PIV-метода. Для этого в жидкость добавлен визуализатор (светоотражающие частицы). Обтекание тела имеет отрывной характер. Для всех состояний тела характерно наличие вытянутого вдоль цилиндра двумерного вала жидкости. Вблизи торцов цилиндра течение трехмерно.

При наблюдении сбоку вблизи торцов тела наблюдаются стационарные вихри противоположной закрутки. Отметим, что вблизи торцов тела в плоскости, перпендикулярной его оси, вихри не наблюдаются. На некотором расстоянии от торцов (рис. 13) можно увидеть пару сформировавшихся вихрей противоположной закрутки. В средней части тела остается только один из вихрей. Относительно центра тела течение симметрично.

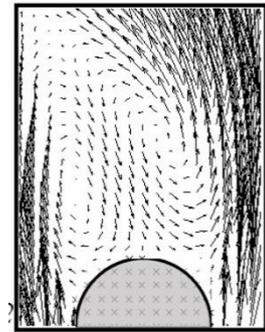


Рис. 13. Структура течения вблизи «подвешенного» цилиндра; $\Omega = 11.7$ рад/с

В п.3.3 рассматривается случай **неравномерного** вращения полости. При модуляции скорости вращения граница полости на фоне равномерного вращения совершает азимутальные колебания с заданной амплитудой φ_0 и частотой Ω_{lib} . Вращательные колебания полости ($\Omega_{lib} \neq 0, \varepsilon \neq 0$) вызывают азимутальные колебания тяжелого тела ($r = 0.39$ см, $l = 5.8$ см, $\rho = 1.36$) за счет вязкого взаимодействия тела со стенкой. Вместе с тем внутренний столб жидкости за пределами вязкого динамического слоя вращается с постоянной скоростью Ω_{rot} . В результате колебаний цилиндра относительно жидкости возникает сила, отталкивающая цилиндр от границы кюветы. В то же время (в условиях проведенного эксперимента) сила отталкивания уравнивается весом тела в центробежном поле. Однако под

действием силы тяжести тело в «подвешенном состоянии» совершает радиальные колебания, с частотой вращения, приближаясь и удаляясь от стенки.

В п.3.4 описан эксперимент в условиях, когда действие силы тяжести на тело пренебрежимо мало. Исследуется влияние модуляции скорости вращения полости на динамику тела близкой плотности к жидкости ($\rho = 1.02$) в зависимости от параметров модуляции. При модуляции скорости вращения кюветы тело, находясь в центрифугированном состоянии, отрывается от границы полости при пороговом значении амплитуды модуляции ε (рис. 14). При этом зазор между телом и стенкой остается постоянным и увеличивается с амплитудой модуляции. Изменение основных характеристик движения тела со временем изучено с помощью скоростной видеокамеры. Обнаружено, что помимо азимутальных колебаний вдоль границы полости тело совершает вращательные колебания вокруг своей оси в фазе с азимутальными колебаниями.

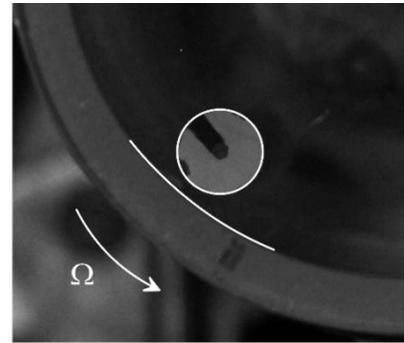


Рис. 14. Квазистационарное положение тела; $v = 0.10$ Ст, $\varepsilon = 0.80$, $\Omega_{rot} = \Omega_{lib} = 25.1$ рад/с

В рассматриваемой задаче в роли безразмерного параметра, отвечающего за амплитуду колебаний полости, а значит и за амплитуду колебаний тела, выступает амплитуда модуляции скорости вращения полости $\varepsilon = \varphi_0 \Omega_{lib} / \Omega_{rot}$, здесь φ_0 – амплитуда азимутальных колебаний полости. На рис. 15,а представлена зависимость безразмерного зазора d/δ от ε для трех значений $n_L = \Omega_{lib} / \Omega_{rot}$. Для всех значений n_L зависимость $d/\delta(\varepsilon)$ имеет схожий вид: после отрыва тела от стенки зазор монотонно растет с ε .

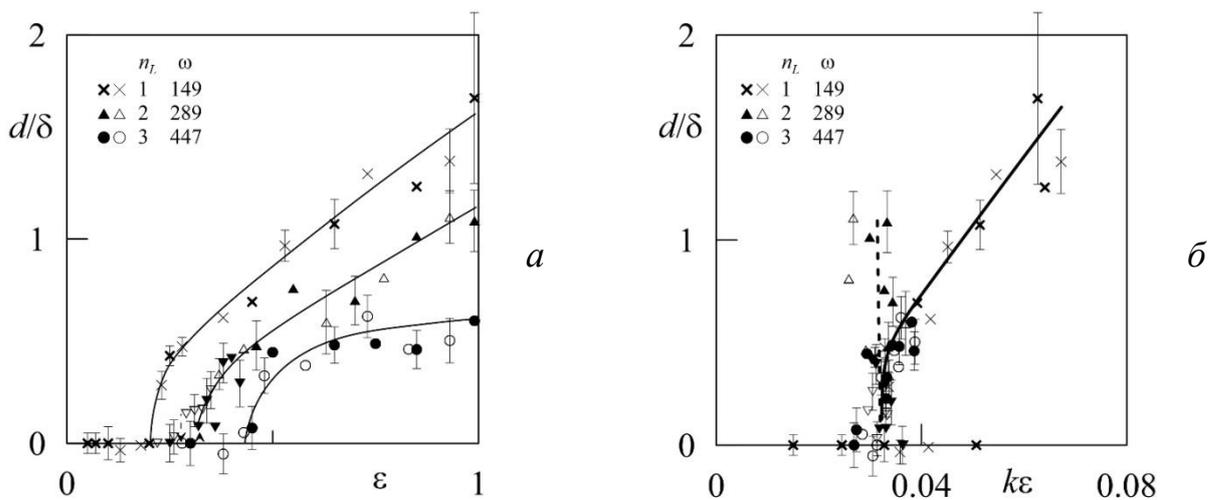


Рис. 15. Зависимость безразмерного зазора от ε (а) и $k\varepsilon$ (б) для различных n_L

При повышении частоты модуляции (с увеличением n_L), пороговое значение ε смещается вправо по оси. Символы на графике показывают среднее за один оборот значение зазора d/δ , интервал показывает отклонение от

среднего значения. С повышением ε тело удаляется от стенки на расстояние, составляющее $\delta - 2\delta$. Подъемная сила определяется амплитудой колебаний тела относительно жидкости, поэтому в качестве управляющего безразмерного параметра выбран комплекс $k\varepsilon = \Phi_{b0} n_L$, Φ_{b0} – амплитуда азимутальных колебаний тела. Обобщение экспериментальных результатов для $n_L = 1, 2$ и 3 показывает, что пороговые значения $k\varepsilon$, при которых тело заданной плотности занимает устойчивое положение на некотором расстоянии от стенки, для всех значений n_L совпадают (рис. 15,б). Эксперименты с цилиндром в полости большего радиуса показали, что в общем случае помимо параметра $k\varepsilon$ порог определяется относительным размером тела r/R .

В п.3.5 дано теоретическое описание механизма генерации подъемной силы, действующей на цилиндрическое тело во вращающейся цилиндрической кювете с жидкостью, в приближении высоких частот вибраций и малого размера тела по сравнению с размером полости. Рассмотрена задача о силе отталкивания, действующей на тело радиусом r в заполненной жидкостью цилиндрической полости радиуса R в отсутствие внешнего силового поля (рис. 16). Полость совершает вращение по закону $\Omega = \Omega_{rot}(1 + \varepsilon \cos \Omega_{lib} t)$. За счет вязкого взаимодействия со стенкой полости тело совершает азимутальные колебания вблизи границы с амплитудой $k\varepsilon$. Относительно столба жидкости, равномерно вращающегося с угловой скоростью Ω_{rot} . Задача

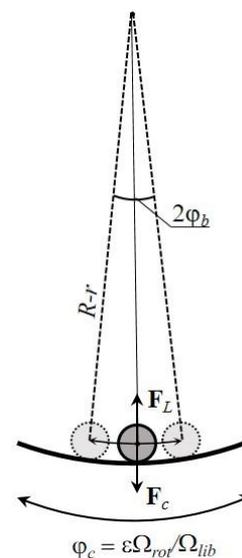


Рис. 16. Силы, действующие на цилиндр в системе отсчета равномерно вращающейся жидкости

рассматривается в приближении малого размера тела ($R \gg r$) и высоких частот либраций ($r \gg \delta$). Подъемная сила измеряется методом подвеса тела в центробежном поле, когда подъемная сила уравнивает вес тела в центробежном поле. Опираясь на полученное в (Сенницкий, 2005) точное решение для подъемной силы, действующей на цилиндр вблизи твердой стенки в осциллирующем потоке, получим выражение для расчета коэффициента подъемной силы $C_L = \pi r(\rho - 1)/k^2 \varepsilon^2 (R - r)$. В (Шипицын и др., 2014) в приближении высоких частот ($\omega \gg 1$) и малых амплитуд колебаний цилиндра на расстоянии толщины пограничного слоя от плоской границы, теоретически было получено значение коэффициента подъемной силы $c_l = 2.24$. Полученное значение справедливо для тел малого размера, $R \gg r$, во вращающейся системе в предельном случае высоких частот колебаний тела. На рис. 17 видно, что экспериментальные точки находятся значительно выше расчетного значения $c_l = 2.24$, отмеченного на вертикальной оси крестиком. Из проведенного анализа следует, что качественное отличие подъемной силы

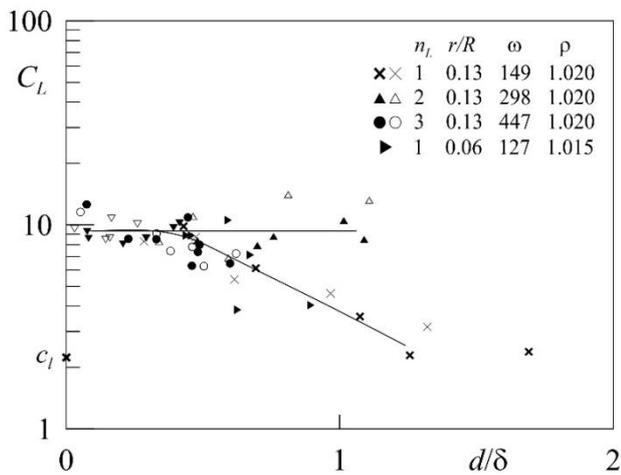


Рис. 17. Зависимость коэффициента подъемной силы C_L от d/δ

результатом такого комбинированного, поступательно-вращательного осциллирующего движения тела может быть осредненная подъемная сила, связанная с эффектом Магнуса.

Заключение

В диссертационной работе исследована вибрационная динамика твердых тел в жидкости вблизи твердой границы, изучена действующая на них подъемная сила. В качестве тел использовались пластины и цилиндры различной относительной плотности. Исследование проведено в широком диапазоне безразмерных частот и амплитуд вибраций при варьировании геометрических размеров тел и вязкости жидкости.

1. Впервые экспериментально изучена динамика плоского тела в заполненной жидкостью прямоугольной полости, совершающей продольные поступательные колебания.

- Обнаружено, что под действием вибраций тело, плотность которого отличается от плотности жидкости, отталкивается от границы полости (тяжелое – от дна, легкое – от потолка) и занимает устойчивое положение на некотором расстоянии от последней, продолжая совершать колебания вдоль стенки полости. Сила отталкивания, связанная с гидродинамическим взаимодействием, проявляется на расстоянии сравнимом с толщиной слоя Стокса.
- Методом скоростной видеосъемки изучена вибрационная динамика легкого и тяжелого тел. Обнаружено, что тела совершают одновременно поступательные колебания и угловые качания малой амплитуды. В рассмотренных случаях динамика тяжелого тела в целом аналогична динамике легкого.
- Показано, что подъемная сила, действующая на осциллирующее в жидкости тело, зависит от безразмерной частоты ω . С увеличением ω коэффициент подъемной силы растет, а в высокочастотной области при малых амплитудах колебаний тела зависимость от ω исчезает.

- В случае больших амплитуд колебаний тела, характерных для тел большой относительной плотности, обнаружены новые режимы его поведения. Показано, что при колебаниях тела с большой амплитудой и отрывном характере его обтекания, подъемная сила понижается с увеличением безразмерной амплитуды колебаний тела.
2. Дано теоретическое описание вибрационной подъемной силы, действующей на тело прямоугольной формы в полости с жидкостью, в высокочастотном приближении. Найден порог удержания тела на некотором расстоянии от границы полости (величина подъемной силы) в зависимости от его плотности и относительной толщины. Сравнение экспериментальных результатов с теоретическими дает удовлетворительное согласие в пределе малых амплитуд колебаний тела.
3. Исследована динамика тяжелого цилиндрического тела, помещенного в заполненную вязкой жидкостью цилиндрическую полость, при равномерном вращении.
- Обнаружены новые качественно различающиеся состояния тела в зависимости от скорости вращения полости: скольжение вдоль границы полости, «шаги» цилиндра, подвес тела во вращающейся полости, неустойчивость подвешенного состояния, центрифугированное состояние, гравитационный отрыв.
 - Изучена структура течения при различных состояниях тела. Обнаружено, что для всех состояний над телом формируется вытянутый вдоль цилиндра двумерный вихрь. Вблизи торцов цилиндра течение имеет трехмерную структуру.
4. Впервые изучена динамика тяжелого цилиндрического тела в неравномерно вращающемся цилиндре с жидкостью.
- Обнаружено, что при модуляции скорости вращения полости по достижении порогового значения амплитуды модуляции тяжелое тело, вращающееся вместе с кюветой, отталкивается от границы кюветы и занимает устойчивое положение на некотором расстоянии от последней.
 - Изучены траектории движения тела в зависимости от амплитуды модуляции. Показано, что помимо азимутальных колебаний относительно полости цилиндр совершает вращательные колебания вокруг своей оси в фазе с азимутальными колебаниями.
 - Показано, что найденный в эксперименте коэффициент подъемной силы значительно превосходит расчетное теоретическое значение в случае поступательных тангенциальных колебаний тела. Сделано предположение, что это связано с возникновением дополнительной подъемной силы, генерируемой вращательными колебаниями тела.

Публикации по теме диссертации

1. Kozlov V., Vlasova O. The repulsion of flat body from the wall of vibrating container filled with liquid // *Microgravity Science and Technology*. – 2015. – Vol. 27, – No 4. – P. 297–303.
2. Kozlov N. V., Vlasova O. A. Behavior of a heavy cylinder in a horizontal cylindrical liquid-filled cavity at modulated rotation // *Fluid Dynamics Research*. – 2016. – Vol. 48, – No. 5. – P. 055503.
3. Kozlov V., Vlasova O. Behavior of a Flat Solid in a Container with Liquid Subject to Large Amplitude Vibration // *Shock and Vibration*. – 2016. – Vol. 2016.
4. Vlasova O., Kozlov N. Influence of the static field on a heavy body in a rotating drum with liquid // *The European Physical Journal E*. – 2018. – Vol. 41, – No. 2. – P. 26.
5. Власова О. А., Козлов В. Г., Козлов Н. В. Динамика тяжелого тела, находящегося во вращающейся кювете с жидкостью, при модуляции скорости вращения // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2018. – Т. 59, – № 2. – С. 39–49. Перевод статьи: O. A. Vlasova V. G. Kozlov N. V. Kozlov. Lift Force Acting on a Heavy Solid in a Rotating Liquid-Filled Cavity with a Time-Varying Rotation Rate // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – Vol. 59, – No.2. – P. 219–228.
6. Власова О. А., Козлов В. Г., Щипицын В. Д. Экспериментальное исследование динамики прямоугольного тела в заполненной жидкостью полости при вибрациях // *Конвективные течения*. – 2013. – № 6. – С. 49–64.
7. Власова О. А., Козлов В. Г. Динамика прямоугольного тела в заполненной жидкостью полости при вибрациях. Теория // *Конвективные течения*. – 2013. – № 6. – С. 65–74.
8. Власова О. А., Козлов Н. В. Поведение тяжелого цилиндра в горизонтальной вращающейся цилиндрической полости с жидкостью // *Конвективные течения*. – 2015. – № 7. – С. 176–192.
9. Власова О. А., Козлов Н. В. Структуры течения жидкости вблизи цилиндра во вращающейся цилиндрической полости // *Конвективные течения*. – 2017. – № 8. – С. 94–109.
10. Vlasova O.A., Kozlov V.G., Schipitsyn V.D. Dynamics of rectangular solid and mean flows in filled with liquid cavity under vibration // *Proc. Fluxes and Structures in Fluids*. Russia. St. Petersburg. A. Ishlinsky Inst. For Problems in Mech. RAS. June 25-28 2013. P. 327–329.
11. Vlasova O. A., Kozlov V. G. Vibrational suspension of solid block in liquid // *Proc. Advanced Problem in Mechanics*. Russia. St. Petersburg. June 30 – 5 July 2014. P. 123–132.
12. Vlasova O. A., Kozlov V. G. Ascent of heavy plate in liquid under horizontal vibration // *Proceedings of 5-th international scientific school of young scientists “Waves and vortices in complex media”*. Moscow, November 25 – 28, 2014. P. 63–64.