

На правах рукописи

Рыбкин Константин Анатольевич

ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ГРАВИТАЦИОННОГО  
ДРЕЙФА КОМПАКТНЫХ ТЕЛ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2013

Работа выполнена на кафедре общей физики ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор Юрий Клавдиевич Братухин

**Официальные оппоненты:** Брацун Дмитрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент, Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, заведующий кафедрой теоретической физики

Алабужев Алексей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, Институт механики сплошных сред УрО РАН, старший научный сотрудник лаборатории вычислительной гидродинамики

**Ведущая организация:** Институт механики Уфимского научного центра РАН, г. Уфа

Защита состоится 24 декабря 2013 г. в 17<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.189.06 при ФГБОУ ВПО «Пермский государственный исследовательский университет» по адресу: 614990 г. Пермь, ул. Букирева, 15, ауд. 902.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пермского государственного национального исследовательского университета; электронная версия автореферата доступна на сайте Пермского государственного национального исследовательского университета по адресу: <http://www.psu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2013 г.

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

В.Г. Гилев

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность проблемы.** Дрейф компактных тел – один из самых распространённых процессов на Земле. Его экспериментальное исследование и математическое моделирование началось ещё в XIX столетии. При решении классических задач по обтеканию шаров (Стокс), цилиндров (Карман), пластин (Кирхгоф), а также устойчивости струй (Рэлей) были предложены модели течений и сформулированы основные уравнения для описания этих медленных динамических процессов. Параллельно, и в значительной мере независимо, развивалось стохастическое (или статистическое) направление, с самого начала ориентированное на описание развитой турбулентности (Рейнольдс, Колмогоров). Но только с появлением работы Э. Лоренца (1963 г.) заканчивается долгое противостояние двух фундаментальных научных направлений и начинается активное изучение «пограничных процессов» на пересечении динамической и стохастической теорий. Если полвека назад экспериментатор отбрасывал сложные аperiodические колебания в полученных временных рядах как брак, то сейчас стало ясно, что эти процессы могут генерироваться самой системой, а эффект хаотизации движений в детерминированных нелинейных системах с образованием диссипативных структур представляется как научно обоснованное явление фундаментальной значимости. В настоящее время интерес к этой тематике продолжает нарастать, о чём свидетельствует увеличивающийся поток научной информации, большое количество конференций и школ. Причинами столь многолетней популярности проблемы динамического хаоса являются, помимо всего прочего, междисциплинарный характер этого явления и широкий спектр экспериментальных приложений теории детерминистического хаоса в различных областях знаний.

Овладев теорией стохастичности, экспериментаторы и инженеры качественно улучшают работу радиотехнических устройств, упрощают медицинскую диагностику, интенсифицируют процессы в металлургической, нефтяной, химической отраслях промышленности. Особое внимание уделяется гидродинамическим течениям, поскольку именно для них, благодаря исключительным возможностям визуализации, получены удивительные результаты, иллюстрирующие существование диссипативных структур не только в области перехода, но и в уже развитой турбулентности. Однако в литературе практически не представлены специальные исследования влияния упорядоченных структур в жидкостях и газах на свободно дрейфующие в них тела. Между тем создание моделей многофазных систем невозможно без детального анализа «элементарных» задач о поведении компактных тел, свободно дрейфующих в жидкостях и газах в поле тяжести. Этим вопросам посвящена данная работа.

**Цель работы.** Работа посвящена экспериментальному исследованию процессов динамической стохастизации автоколебаний при свободном гравитационном движении компактных тел различной симметрии в жидкостях и

газах. Основной задачей работы является идентификация и классификация механизмов возникновения диссипативных структур и типичных свойств маломерного хаоса в этом процессе.

**Научная новизна.** Подавляющее большинство работ по термодинамике неравновесных процессов в открытых нелинейных системах с детерминированным хаосом выполнялось на радиофизических приборах или численными методами на модельных примерах. Между тем гидродинамический эксперимент может служить не только проверкой на грубость полученных такими способами результатов, но может выступить и в качестве самостоятельной методики исследования сложной динамики автостохастических систем. Новым в данном исследовании является, кроме того, смещение акцента с изучения турбулентных течений в распределённых средах на анализ влияния вихревых течений на помещённые в них компактные тела различной геометрической формы.

В работе впервые:

- экспериментально получена апериодическая смена почти регулярных колебаний хаотическими и обратно (сценарий Помо – Манневилля);
- экспериментально зарегистрирован эффект «насыщения размерности» вдоль цепочки всплывающих пузырей в воде при определённой величине степени связи;
- зарегистрированы режимы стохастического резонанса;
- в экспериментах получен  $1/f$ - шум (фликкер-шум);
- на основе анализа временных рядов с помощью различных методик (алгоритм Грассбергера и Прокачия, метод фазовой рандомизации) показано, что фазовые траектории исследуемых объектов имеют динамическое происхождение (размерность пространства вложения конечна) и располагаются на странном аттракторе (дробное значение корреляционной размерности); последний вывод подтверждён расчётом спектров Ляпунова;
- определены энтропии Колмогорова-Синяя, с помощью которых сделаны оценки «временных горизонтов» Пригожина для выбранных временных рядов;
- экспериментально исследован эффект авторотации при дрейфе сферических, эллипсоидальных капсул и пластинок;
- экспериментально определены плотности вероятности отклонения траектории шаров от вертикальной прямой в сторону и сделаны оценки соответствующих функций распределения;
- в задачах по дрейфу полых цилиндров и пластин обнаружен неравновесный фазовый переход, индуцированный мультипликативным шумом;
- при экспериментальном изучении дрейфа всплывающих попарно пузырьков зарегистрирован эффект стохастической синхронизации.

**Достоверность результатов** работы обеспечивается:

- апробированными методами измерения и обработки данных;
- совпадением данных, полученных разными методами;

–совпадением полученных результатов с данными других исследователей в смежных областях.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

Результаты экспериментального исследования гравитационного дрейфа пузырей, твёрдых шаров, эллипсоидов, цилиндров и прямоугольных пластинок в газах и жидкостях. Данные, полученные в результате анализа, включающего в себя, использование дискретного преобразования Фурье и вейвлет-анализа, реконструкцию динамики временных рядов с построением фазовых портретов и определения размерностей фазового пространства включения и аттракторов для всех исследованных систем.

**Научная и практическая значимость результатов** Теория неравновесных процессов в открытых нелинейных системах стала успешным подходом к решению проблем самоорганизации в естественных науках – от физики лазеров и твёрдого тела, химии и метеорологии до моделей биологического, нейронного и экологического развития. Во всех этих случаях самоорганизация означает неравновесный фазовый переход, происходящий в закритических условиях. Вместе с тем специалисты, работающие в социальных и экономических науках, политике и гуманитарных науках, сознают, что основные проблемы человечества также отличаются глобальностью, сложностью и нелинейностью. Общность возникновения диссипативных структур и фазовых переходов привела к возникновению синергетики – нового междисциплинарного научного направления. Его цель – выявление и систематизация общих идей, общих методов и общих закономерностей в самых различных областях знаний.

Данная работа даёт для синергетики несколько новых примеров самоорганизации с образованием диссипативных структур в разнообразных по физическому содержанию задачах. Её научная и практическая значимость заключается и в чисто практическом применении полученных результатов в научно-исследовательской и учебной работе в Пермском государственном национальном исследовательском университете, Пермском государственном гуманитарно-педагогическом университете, Институте механики сплошных сред УРО АН. Результаты диссертации включены в учебные пособия по курсам «Диссипативные структуры и нестационарные процессы в межфазной гидродинамике», «Межфазная гидродинамика» и «Гидромеханика невесомости».

Диссертационная работа выполнялась в рамках разрабатываемой кафедрой общей физики Пермского государственного национального исследовательского университета темы «Конвекция и теплообмен в ламинарном, переходном и турбулентном режимах; влияние осложняющих факторов на конвективную и гидродинамическую устойчивость». Исследования являются также составной частью государственной программы поддержки ведущих научных школ (гранты №96-15-96084 и №00-15-00112), международного научно-технического проекта «Конвективные явления и процессы тепломас-

сопереноса в условиях невесомости и микрогравитации», программы «Университеты России» (направление II, «Неравновесные процессы в макроскопических системах»), работы выполнялись при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ №09-01-00846, №12-01-31024 и гранта CRDF PE-0090.

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались на: Всероссийской научной конференции студентов физиков, 2008, 2009, 2010 Уфа, Кемерово, Волгоград; Всероссийской молодежной конференции «Физика и прогресс», 2008 СПб; Межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Физика для Пермского края» 2008 Пермь; XVI Зимняя школа по механике сплошных сред 2009 Пермь; Всероссийской конференции молодых учёных «Неравновесные переходы в сплошных средах» 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 Пермь; неоднократно на Пермском городском гидродинамическом семинаре им. Г.З. Гершуни и Е.М. Жуховицкого; научном семинаре Института механики Уфимского научного центра УНЦ РАН, Уфа.

**Публикации.** Основные результаты исследований опубликованы в 10 [1-10] печатных работах, из них 3[1-3] статьи в российских журналах, входящих в перечень ВАК, 5 статей в сборниках научных трудов конференций и 2 работы в сборниках тезисов.

**Личный вклад автора.** В перечисленных выше работах автору принадлежат изготовление и настройка экспериментальных установок, отработка методики и проведение измерений, участие в аналитических и численных расчетах, обработке экспериментальных результатов и их интерпретации.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, трёх глав с изложением результатов, заключения и списка цитированной литературы, включающего 123 наименования. Общий объём диссертации 156 страницы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулирована её цель, научная новизна и практическая значимость её результатов.

**Первая глава** содержит краткий обзор публикаций последних десятилетий по различным вопросам нелинейной хаотической динамики открытых систем. Отмечены основные работы, которые дали направление «физике открытых систем», даны определения используемых в работе редких и неустоявшихся терминов. По отдельным, принципиальным вопросам, кратко затронутых в публикациях, приведены пояснения и предложены физические модели, иллюстрирующие проблемы (локальные и нелокальные бифуркации, перемежаемость, стохастический и когерентный резонансы, стохастическая фильтрация и др). Более подробно обсуждаются публикации по принципиальным, до сих пор окончательно нерешённым вопросам таким, как источники фликкер-шумов и относительная степень упорядоченности или хаотичности состояний открытых систем.

**Вторая глава** содержит описание используемых приборов и методики обработки полученных временных рядов. Приведены характеристики как

специально созданных установок, так и промышленных приборов и методик исследований.

**Третья глава** разделена на четыре параграфа и содержит основные результаты проведенных исследований.

В первом параграфе описаны результаты экспериментальных исследований по количественной оценке динамических характеристик осцилляций, реализующихся при свободном дрейфе в жидкости воздушных пузырьков и, для сравнения, лёгких твёрдых шаров.

Эксперименты по изучению свободного всплывания воздушных пузырей проводились в специально изготовленных кюветах по методике, изложенной во второй главе. Для сравнения фотографировались лёгкие сферические и эллипсоидальные капсулы, изготовленные

на 3D принтере ZPrinter-250, а также полые, изготовленные промышленным способом из желатина эллипсоидальные и сферические капсулы. Результаты обработки экспериментальных данных представлены с помощью фотографий и графиков. На рис.1а изображены вихри за движущимися пузырями или шарами, полученные по методике PIV. Вихри, периодически отрывающиеся с поверхности всплывающего тела, уносят с собой не только импульс, но и момент импульса. В результате всплывающие пузыри и шары смещаются вбок от вертикали и поворачиваются, причиной отклонений пузырей от вертикали может быть ещё и деформация их формы, неизбежно возникающая при дрейфе пузырька диаметром  $d > 1$  мм, рис.1 в. Для доказательства предложенного объяснения отклонения тел от вертикали на рис. 1 б представлены последовательные изображения всплывающей сферической капсулы. Видимые повороты линии доказывают быстрое вращение лёгкой сферической капсулы. В диссертации приведены также фотографии вихрей, полученные методом стробоскопической визуализации.

Кроме реальных фотографий, доказывающих существование отрыва вихрей от всплывающих тел, обсуждаются Фурье-спектры временных рядов

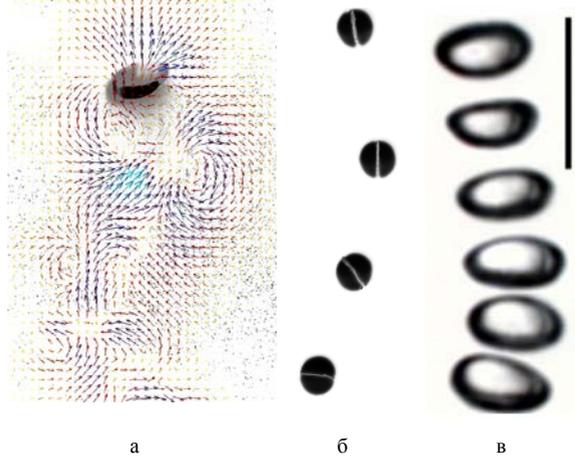


Рис.1. а) Фотография вихря образовавшегося за капсулой с диаметром  $2.0 \pm 0.1$  см, полученные методом PIV. б) четыре последовательные изображения всплывающей сферической капсулы. Период съёмки 0.2 с. На капсуле прочерчена линия экватора. в) реальное фото, полученное наложением друг на друга шести фотографий всплывающих пузырей. Период съёмки 0.1 с, длина масштабной полоски 25 мм

дрейфа пузырька и тонкостенной сферической капсулы. Из рис. 1 б, в видно, что у шара активны две степени свободы: поступательная и вращательная, в то время как у пузыря к ним добавляется ещё одна, связанная с деформацией формы. Поэтому на спектрах Фурье дрейфа пузырька и шара видны три и два пика соответственно (рис. 2).

Как видно из приведённых графиков, получаемые результаты экспериментов отягощены шумами различного происхождения. Разграничение шумовых и динамических сигналов проведено известным методом фазовой рандомизации. Для этого фаза Фурье-образа исходного сигнала изменялась случайным образом, затем с помощью обратного преобразования Фурье восстанавливался временной ряд. По полученным реальной и рандомизированной реализациям вычислялись корреляционные интегралы Грассбергера и Прокачия. Для этого были сконструированы псевдофазовые пространства Такенса из  $m$ -мерных векторов

$$X^{(i)} = \{x(t_i), x(t_i + \tau), x(t_i + 2\tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)\}$$

, где время задержки  $\tau$  определялось методом автокорреляционной функции, а в качестве наблюдаемой было выбрано отклонение траектории пузырька от вертикали в горизонтальной плоскости  $y = 0$  (анфас). Вектор  $X^{(i)}$  при изменении  $t_i$  прочерчивает в  $m$ -мерном пространстве траекторию, воспроизводящую по гипотезе Такенса некоторые

топологические свойства реального фазового пространства (фрактальные размерности, размерности вложения аттракторов, амплитуды шума в сигнале). Как оказалось, корреляционные интегралы (рис. 3 а) реальной и рандомизированной (рис. 3 а) реализаций различаются качественно: корреляционная размерность в «суррогатном» наборе данных с ростом размерности псевдофазового пространства растёт неограниченно (такое поведение характерно для хаотических режимов типа «белый шум»), тогда как для реальной наблюдаемой рост прекратился уже при  $m = 4$  (графики на рис. 3 построены только для чётных  $m$ , которые нумеруют пространство Такенса от  $m = 2$  (верхние графики) до 14(нижние графики)). На этом основании можно утверждать, что в реальном процессе присутствуют динамические составляющие.

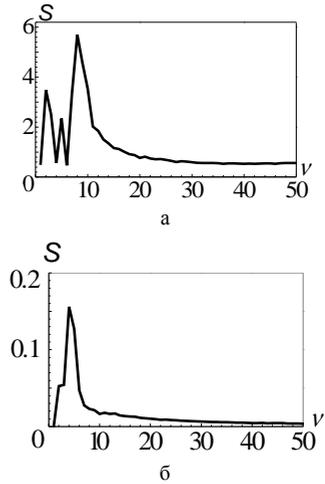


Рис.2. Спектры мощности процесса всплывания пузырька (а) и тонкостенной сферической капсулы (б) примерно одинаковых размеров. Амплитуды колебаний отличаются в 30 раз из-за различий объектов по массе

На рис. 4. представлен график зависимости модуля скорости жидкости осреднённой по области съёмки при дрейфе капсулы в последовательные моменты времени, полученные методом PIV.

В ходе экспериментов по свободному дрейфу пузырей в гравитационном поле были отмечены факты резкого перехода от квазипериодических колебаний к хаосу. На рис. 5. видны участки «согласованных» регулярных колебаний пузырей между хаотическими фазами. Такие режимы дрейфа с чередованием во времени почти регулярных колебаний с интервалами хаотического поведения характерны для перемежаемости.

Во втором параграфе рассмотрено явление стохастической синхронизации при всплывании пузырей в жидкости.

Целью данной части исследования было установление сценария хаотизации дрейфа идентичных пузырей, всплывающих друг за другом в длинном ряду, образованном инжектором постоянной мощности. Если движение первого пузыря достаточно малого радиуса в спокойной неподвижной изотермической жидкости после переходного процесса можно считать происходящим с постоянной скоростью, то уже второй пузырь, двигаясь в жидкости, возмущённой первым пузырьём, требует для своего описания пространства вложения большей размерности.

Эксперименты по дрейфу цепочки пузырей проводились по описанной во второй главе методике в стеклянной кювете  $25 \times 25 \times 100 \text{ см}^3$ . Компрессор был настроен на одинаковый расход, при этом получались пузыри радиуса  $r = (0.6 \pm 0.1) \text{ см}$ , скорости группы первых десяти пузырей составляли  $v = (50.0 \pm 0.2) \text{ см/с}$ , расстояние между центрами ближайших друг к другу пузырей во время движения самопроизвольно менялось от одного до десятка диаметров. Поскольку размеры пузырей превосходили капиллярную постоянную для воды примерно в полтора раза, форма пузырей во время движения не оставалась неизменной (см. рис. 1. в). Эксперименты показали, что пузыри, двигаясь в вихревом поле, созданном предыдущими пузырями, начинают догонять друг друга, образуя кластеры (рис.6).

Рис. 6 иллюстрирует, что образовавшиеся кластеры в результате стохастической синхронизации движутся с постоянной скоростью, несмотря на то,

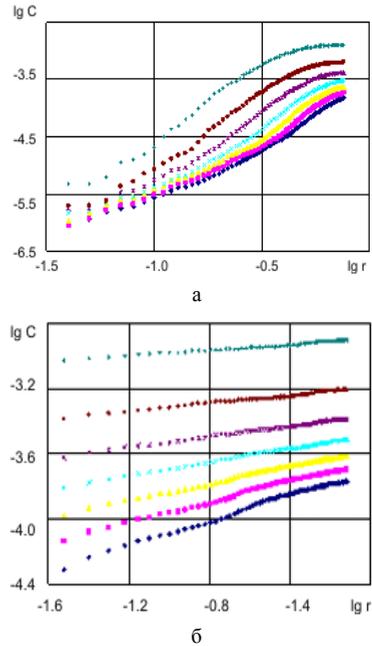


Рис.3. Корреляционные интегралы  $\lg C(\lg r)$  реальной (а) и рандомизированной (б) реализаций дрейфа пузыря.

что состоят из десятков пузырей. Этот результат доказывает прямая линия, проведённая на рис. 6 по фронту первого кластера, тангенс угла наклона которой пропорционален вертикальной скорости кластера.

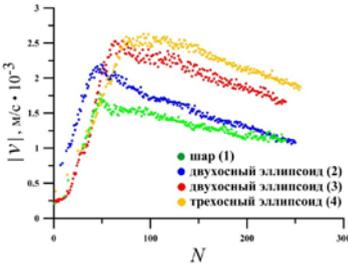


Рис. 4. График зависимости средней скорости вихрей четырёх выбранных тел от номера кадра (зелёные точки – шар  $R = (20,4 \pm 0,1)$  мм; аксиально симметричные эллипсоиды с полуосями: синие -  $17,4 \pm 0,1$  и  $28,8 \pm 0,1$  и красные  $14,3 \pm 0,1$  и  $40,1 \pm 0,1$  и трёхосный - коричневые  $20,3 \pm 0,1$ ;  $34,1 \pm 0,1$ ;  $12,4 \pm 0,1$  в мм)

В диссертации приведены графики смещений по горизонтальным осям первого, 9-того, 17-того и 24-того пузырей в цепочке, соответствующие Фурье-спектры, функции распределения и корреляционные интегралы, которые свидетельствуют о «насыщении размерности» вдоль цепочки – эффекту, обнаруженному группой В.С Анищенко в полубесконечной однонаправленной связанной цепочке генераторов Ван дер Поля.

Таким образом, в экспериментах с цепочкой следующих друг за другом идентичных пузырей отмечены эффекты кластеризации объектов, эффект стоха-

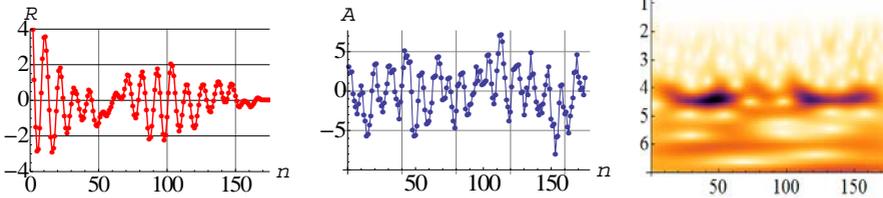


Рис.5.Автокорреляционная функция, временной ряд и вейвлет - спектр дрейфа отдельного пузыря диаметра  $(0.64 \pm 0.01)$  см.

стического резонанса, эффекты «насыщения размерности» и стохастической синхронизации.

В третьем и четвертом параграфах обсуждается возникновение неравновесных фазовых переходов, индуцированных шумами. Исследования последних лет показали, что в нелинейных диссипативных системах шум может играть конструктивную роль, индуцируя новые структуры и таким образом упорядочивая систему. В данном параграфе описан и экспериментально изучен один из таких индуцированных шумом переходов – стохастический резонанс (СР). Явление СР проиллюстрировано на классическом примере свободного всплывания в воде тонкостенных пустых шариков. Известно, что траектория даже маленьких болотных пузырьков никогда не бывает прямой вертикальной линией. Подверженные одновременно воздействию гравитационных и вязких сил и пузырьки, и рассмотренные в работе шарики при своём дрейфе под действием гравитационных сил непредсказуемым образом смещаются в сторону от прогнозируемой по законам движения в гравитаци-

онном поле, вертикали. Отметим, однако, что стохастичность метаний макроскопических тел сантиметрового размера имеет динамическое происхождение и этим принципиально отличается от движения броуновских частиц.

Очевидно, что при малых числах Рейнольдса (в докритической области) траектория всплывающего в вязкой жидкости лёгкого тела будет прямой вертикальной линией, а фазовая размерность вложения системы равна единице: для однозначного определения движения центра масс шара достаточно только одной координаты  $z(t)$ . При переходе через критическую точку  $Re^*$  спонтанно возникающие вихри, срывающиеся с критических точек поверхности, сообщают телу толчки различной мощности и направления. При дальнейшем увеличении чисел Рейнольдса увеличивается как интенсивность вихрей Кармана, так и частота их отрыва. Соответственно увеличивается среднее отклонение траектории шара от прямой линии и усложняется (обогащается резонансными и аддитивными шумовыми частотами) спектральная плотность процесса. (На движение пузырьков большое влияние оказывает вызванная движением деформация формы. Чтобы исключить этот эффект, вызывающий мультипликативный шум, возникновение стохастического резонанса было продемонстрировано на примере дрейфа твёрдых шаров.) В результате нелинейного взаимодействия вихрей, отрывающихся с поверхности шара, в системе устанавливаются относительно регулярные колебания с одной - двумя выделенными частотами (рис. 2 б). Фундаментальное отличие этого резонансного эффекта от классического резонанса в том, что в данном случае система сама по себе не имеет собственной детерминированной частоты. Поэтому стохастический резонанс иногда называют когерентным резонансом или стохастической фильтрацией. В соответствии с данной гипотезой мерой интенсивности отрывающихся вихрей от шара может служить отклонение на  $n$  безразмерных единиц его центра от прогнозируемой вертикали.

Для определения функции распределения  $f(n)$  были выполнены специальные эксперименты по следующей схеме. Шар устанавливался с помощью специального приспособления в центре дна описанной выше кюветы и затем освобождался. С этого начального момента его движение фиксировалось скоростной кинокамерой в проекциях на вертикальную плоскость  $xz$  и, с помощью зеркала, на плоскость  $yz$  лабораторной системы координат, связанной с кюветой. Фиксировались минимальное  $\epsilon_{\min}$ , и максимальное отклонения  $\epsilon_{\max}$  шаров. Весь интервал отклонений шаров  $[\epsilon_{\min}, \epsilon_{\max}]$ , принятый за 50 без-

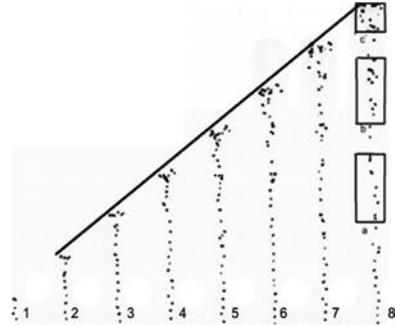


Рис.6. Восемь фотокадров цепочки пузырей. На восьмой цепочке в рамочках выделены образовавшиеся к этому моменту кластеры из пузырей. Прямая линия проведена по фронтам первых пузырей.

размерных единиц, разбивался на 50 одинаковых частей, каждой из которых был присвоен номер  $n$  и подсчитывалось число попаданий  $N$  в каждый из этих участков. Результаты расчётов представлены на рис. 7.

В работе было также проведено по методике Ю. Л. Климонтовича определение степени упорядоченности траекторий аксиально-симметричного и трёхосного эллипсоидов. Анализ показал увеличение упорядоченности траектории последнего, менее симметричного.

Кроме экспериментов по дрейфу эллипсоидальных капсул, проводились наблюдения гравитационного падения в воздухе полых бумажных цилиндров и прямоугольных бумажных листов, которые можно отнести к предельно деформированным эллипсоидам (рис. 8).

Для всех исследуемых объектов проводился полный анализ процессов по методике Такенса, Грассбергера-Прокачия. Приведём здесь корреляционные интегралы для листочка и для трёхосного эллипсоида (рис. 9, 10).

Для вычисления спектра Ляпунова и энтропии Колмогорова – Синая по экспериментально полученным числовым рядам использовался алгоритм Бенеттина и нейронные сети. В рассматриваемой задаче характеристические показатели Ляпунова оказались равными: 1.17; 0.0001; -1,49. Это значит, что рассматриваемая фазовая траектория располагается на странном аттракторе. Как известно, для диссипативной системы сумма показателей Ляпунова отрицательна, но в случае  $n \geq 3$  наряду с отрицательным и нулевым показателем (вдоль фазовой траектории) может существовать и положительный показатель, характеризующий неустойчивость одного из направлений.

Для трёхмерного аттрактора положительный коэффициент Ляпунова равен энтропии Колмогорова – Синая, которая является мерой средней скорости потери информации о состоянии динамической системы с течением времени. К-энтропия обратно пропорциональна интервалу времени, на котором можно предсказать состояние хаотической системы, что позволило И. Пригожину ввести понятие «горизонта времени».

Таким образом, анализ выполненных экспериментов позволил доказать, что фазовые траектории при движении исследуемых компактных тел – шаров, пузырей, эллипсоидов, прямоугольных лёгких пластинок имеют динамическое происхождение (размерности вложений для них конечны) и расположены на странных аттракторах (дробные значения корреляционных разме-

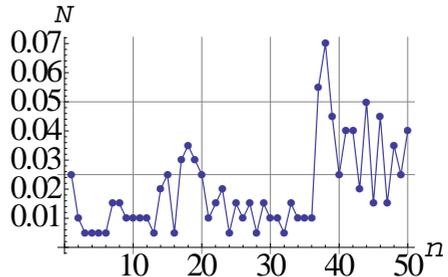


Рис. 7. Зависимость «благоприятных» исходов  $N$  от номера  $n$  для одной из выбранных серий экспериментов.

ностей). Спектральная плотность флуктуаций вблизи резонансных частот спадает по закону, близкому к законам, характерным для фликкер-шумов:  $\ln S \sim -0.82/\ln \nu$ .

В ходе экспериментов обнаружено возникновение неравновесного фазового перехода при изменении симметрии изучаемого объекта. Аксиально-симметричные объекты (цилиндрические гильзы) при падении совершают беспорядочные повороты вокруг случайных осей симметрии и столь же хаотические отклонения в сторону от вертикали.

При понижении симметрии объекта (использование в качестве объектов исследования вместо круглых цилиндров прямоугольных пластинок),



Рис. 8. (а; б). Последовательные положения полых бумажных цилиндров длиной 4 и 2 см и бумажных пластинок одинаковой площади ((в, г, д): длина/ширина листочков (в см) 8.74/0.55; 6.56/0.73; 4.37/1.09 для В, Г и Д соответственно.  $\tau = 0.004$  с. Одна сторона листочков белая, на другой стороне треть площади в центре зачернена) (е; ж; з). Траектории всплывающего шара, аксиально симметричного и трёхосного эллипсоидов соответственно

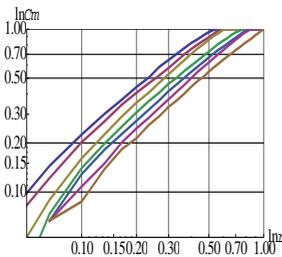


Рис. 9. Корреляционные интегралы, рассчитанные по отклонениям от вертикали листочка с линейными размерами 4.37 / 1.09 (в см). Фрактальная размерность 1.1; спектр Ляпунова (0.628; 0; -1.517)

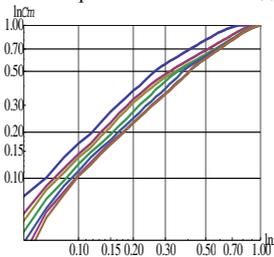


Рис. 10. Корреляционные интегралы, рассчитанные по отклонениям от вертикали трёхосного эллипсоида с полуосями 3.41 / 1.22 / 2.03 (в см)). Фрактальная размерность 0.74; спектр Ляпунова (0.116; 0; -3.105)

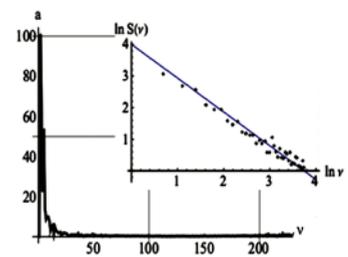


Рис. 11. Характерные спектральные плотности процессов падения одной из идентичных пластинок, траектории которой представлены на рис. 8. Во врезке: график спектральной плотности процесса вблизи резонансных пиков обратно пропорционален частоте (фликкер-шум)

приводит, как и предполагал Э. Шрёдингер при анализе более общих проблем, к появлению пространственно-временной структуры. Отметим в связи с этим результатом аналогию с законами фазовых переходов Ландау, где центральным понятием является так называемый параметр порядка, связанный с изменением симметрии системы.

Кроме того, в задаче зарегистрирован так называемый фликкер-шум – линейное спадание спектральной плотности с частотой и ещё более медленное, логарифмическое спадание автокорреляционной функции (рис.11). Повидимому, процессы дрейфа с фликкер-шумом не являются марковскими из-за того, что окружающая среда действует как накопитель памяти. Движение объекта вызывает возмущения течения самой среды, влияющее на дальнейшее его движение.

В Заключение сформулированы основные результаты работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Результаты экспериментальных исследований свободного гравитационного движения в жидкостях и газах компактных тел различной симметрии (пузырей, шаров, эллипсоидов, коротких аксиально симметричных цилиндров и прямоугольных пластинок) убедительно свидетельствуют о существовании детерминированного хаоса во всех исследуемых процессах. Аттракторы систем в фазовом пространстве являются стохастическими, что выражается в экспоненциальной расходимости фазовых траекторий, а также во фрактальной структуре аттракторов. Рассчитанные количественные характеристики процессов показывают, что аттракторы являются низкоразмерными (размерности пространств вложения от трех до пяти), что свидетельствует о малом числе активных степеней свободы, задействованных в процессах.
2. Показано, что переход к хаосу в задаче по изучению свободного гравитационного дрейфа пузырей осуществляется по модельному сценарию По-мо-Манневиля.
3. Экспериментально зарегистрирован эффект «насыщения размерности» вдоль цепочки всплывающих пузырей в воде при определённой величине степени связи.
4. зарегистрированы режимы стохастического резонанса при экспериментальном изучении движения всплывающих в воде лёгких шаров.
5. В экспериментах по свободному гравитационному дрейфу лёгких цилиндрических тел в воздухе получен  $1/f$ - шум (фликкер-шум).
6. Экспериментально исследован эффект авторотации свободно дрейфующих эллипсоидальных капсул и пластинок.
7. Определены плотности вероятности отклонения шаров от прямой траектории в сторону и сделаны оценки соответствующих функций распределения.

8. В задачах по дрейфу гильз и листочков зарегистрирован неравновесный фазовый переход, индуцированный мультипликативным шумом.
9. При экспериментальном изучении дрейфа всплывающих попарно пузырьков зарегистрирован эффект стохастической синхронизации.
10. Сопоставление дрейфа пузырей и твёрдых шаров убедительно свидетельствует о том, что реальную траекторию тел определяют внешние гравитационные силы и отрывающиеся друг за другом с его поверхности вихри, которые в результате нелинейного взаимодействия формируют диссипативную структуру. Сравнение по методике Ю. Л. Климонтовича степени упорядоченности траекторий аксиально симметричного и трёхосного эллипсоидов показало увеличение степени упорядоченности траектории последнего, менее симметричного.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ**

**1. Макарихин И. Ю., Макарихина О. М., Макаров С. О., Рыбкин К. А. О меандрировании струй, стекающих по наклонной плоскости // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2010. № 4. С. 35-42.**

**2. Братухин Ю. К., Макарихин И. Ю., Макаров С. О., Рыбкин К. А. Гравитационный дрейф эллипсоидов в вязкой жидкости // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2011. № 5. С. 52-64.**

**3. Рыбкин К. А., Фликкер-шум при свободном падении цилиндров в воздухе // Нелинейная динамика. Т. 8. № 3. 2012. С. 629-639.**

4. Братухин Ю. К., Рыбкин К. А., Юдин Р. С., Хаотическая динамика дрейфа сферических тел в вязкой жидкости // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2012. № 4. С. 15-18.

5. Макарихин И. Ю., Рыбкин К. А., Меандрирование стекающих струй // материалы Всероссийской Научной Конференции Студентов Физиков-14. Уфа. 2008. С. 521-522.

6. Рыбкин К. А., Гравитационный дрейф эллипсоидов в вязкой жидкости // тезисы докладов Всероссийской конференции молодых ученых «Неравновесные переходы в сплошных средах». Пермь. 2010. С. 76.

7. Рыбкин К. А., Эффект эрдитарности в экспериментах по меандрированию и падению капель жидкости // материалы Всероссийской Научной Конференции Студентов Физиков-16. Волгоград. 2010. С. 624.

8. Рыбкин К.А., Хаотическая динамика дрейфа цилиндров и прямоугольных пластин в воздухе // тезисы докладов Всероссийской конференции молодых ученых «Неравновесные переходы в сплошных средах». Пермь. 2011. С. 64.

9. Рыбкин К. А., Лаптева Ю. А., Гидродинамические аспекты процесса флотации // материалы краевой научно-практической конференции Физика для Пермского края. Пермь. 2012. С. 16.

10. Рыбкин К. А., Экспериментальное исследование хаотической динамики дрейфа тел различной симметрии // X Международная конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики». Новосибирск. 2012. С. 96.

---

Подписано в печать 20.11.2013 г. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ .

Типография Пермского государственного национального  
исследовательского университета.  
614990, г.Пермь, ул. Букирева, 15.