

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**ИНСТИТУТ ГИДРОДИНАМИКИ**

**им. М.А. Лаврентьева**

СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

(ИГИЛ СО РАН)

Академика Лаврентьева проспект, 15, Новосибирск, 630090

Тел./факс: (383) 333-16-12. E-mail: igil@hydro.nsc.ru

ОКПО 03533978; ОГРН 1025403648600;

ИНН/КПП 5408100064/540801001

Г  
«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Институт  
гидродинамики им. М.А. Лаврентьева  
Сибирского отделения Российской

академии наук,  
доктор физико-математических наук

25 НОЯ 2024

№ 15320-16-23/1388

На № \_\_\_\_\_



Е.В. Ерманюк

2024 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Ширяевой Марии Андреевны  
«Экспериментальное исследование инерционно-волновых режимов течений  
жидкости в неравномерно вращающемся цилиндре», представленную на  
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

**Актуальность темы диссертации.** Инерционные волны во вращающейся жидкости являются одним из важнейших объектов экспериментальных и теоретических исследований в связи с их широким распространением в природе. Необычное дисперсионное соотношение, не содержащее масштабов длины и определяющее направление групповой скорости, приводит к существованию большого класса нетривиальных эффектов. Яркий пример представляют волновые аттракторы, которые являются предельными циклами для волн в замкнутой полости. Предполагается, что такие объекты могут существовать в жидких ядрах планет и спутников, а также вблизи подводных горных хребтов. Наличие волновых аттракторов определяется геометрией области, эффектами вращения и/или стратификации плотности жидкости. Вопрос о влиянии волновых аттракторов на средние течения актуален в задачах геофизической гидродинамики, но данный момент изучен недостаточно полно. Другим интересным и содержательным примером являются собственные моды вращающейся жидкости, которые до сих пор изучались преимущественно с помощью численных и теоретических подходов. В диссертации М.А. Ширяевой основное внимание уделено экспериментальному



исследованию инерционно-волновых режимов течения, их линейной и нелинейной динамики. Для этой цели используется оригинальная геометрия полости, способная поддерживать различные нетривиальные режимы течения и представляющая собой круглый неравномерно вращающийся цилиндр с двумя параллельно (или антипараллельно) наклоненными торцевыми стенками.

Отметим, что среди публикаций автора диссертации имеются работы в научных журналах высокого уровня, для которых актуальность, новизна и достоверность результатов необходимы для опубликования материала. Поддержка проводимых исследований грантами РФФИ и Правительства Пермского края служат дополнительным подтверждением актуальности диссертации.

**Структура и содержание диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 109 наименований. Общий объем работы – 120 страниц, включая 52 рисунка и 7 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность тематики диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, кратко описаны методы исследований, перечислены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов, личном вкладе и структуре работы.

**Первая глава** посвящена обзору литературы по теме диссертации. Дано описание распространения волн во вращающейся однородной по плотности жидкости под действием силы Кориолиса; приведено дисперсионное соотношение для инерционных волн; описаны особенности возбуждения резонансных режимов в замкнутых полостях (волновые аттракторы и инерционные моды). В разделе 1.4 приведено обоснование выбора задач диссертационного исследования.

**Во второй главе** приведены результаты исследования линейных режимов инерционных волн в быстро вращающемся цилиндре с наклонными торцевыми стенками. Рассмотрены ситуации параллельного и антипараллельного наклона. Колебания жидкости задаются продольными либрациями – гармоническими изменениями скорости вращения с частотой  $\sigma$ . Особое внимание уделено методике регистрации пульсационного поля скорости во вращающейся системе отсчета, использующей неподвижные в лабораторной системе отсчета видеокамеру и лазер непрерывного действия. Приведена классификация режимов течений в зависимости от рассматриваемой геометрии полости (угла наклона торцевых стенок) и частоты вносимых возмущений: инерционные моды  $M(n,m,k)$ , волновые аттракторы  $A(n,m)$  и режимы симметричного отражения волновых лучей  $C(n,m)$ . Последний режим является новым и ранее не был описан в литературе. Важным результатом является восстановление пространственной структуры волновых аттракторов: показано, что фокусировка волн наблюдается вблизи плоскости, проходящей вдоль направления наклона торцевых стенок. Разработана программа в среде MATLAB, позволяющая в рамках лучевой теории предсказывать распространение инерционных волн в осевом сечении полости. Программа позволяет варьировать угол наклона торцевых стенок,



длину полости и количество отражений лучей. Показано, что существование волновых аттракторов, наблюдаемых в экспериментах, подтверждается расчётами по лучевой модели.

Экспериментально исследовано влияние числа Экмана на параметры свободных сдвиговых слоев (характерную ширину и скорость течения жидкости), образованных при распространении волн. Для ширины сдвиговой зоны результаты экспериментов полностью согласуются с теоретическим скейлингом  $\sim E^{1/5}$ . Обнаружено, что инерционные волны возбуждают неосесимметричное осреднённое по времени азимутальное течение. Структура течения представляет собой систему двумерных стационарных вихрей, радиальное и азимутальное положение которого определяется положением зоны отражения волн от торцевых стенок. Показано, что скорость дифференциального вращения жидкости квадратичным образом зависит от амплитуды либраций и в диапазоне чисел Экмана  $E \sim 10^{-5} - 10^{-3}$  определяется пульсационным числом Рейнольдса  $Re_p$ .

**В третьей главе** экспериментально исследована устойчивость осреднённого азимутального течения. Показано, что при достижении критического значения амплитуды либраций двумерные стационарные вихри разрушаются. В случае волнового аттрактора пороговые значения амплитуды изменяются с числом Экмана по закону  $\sim E$ , а в случае инерционной моды, как  $\sim E^{3/4}$ . Обнаружено, что неустойчивость азимутального течения является следствием развития триадного субгармонического резонанса, приводящего к интересной нелинейной надкритической динамике системы.

**В заключении** перечислены по главам основные результаты и выводы, полученные в диссертации.

**Достоверность и новизна основных положений.** Результаты диссертации состоят в комплексном экспериментальном исследовании пространственной структуры и временной динамики различных инерционно-волновых режимов и возбуждаемых ими вторичных течений в неравномерно вращающемся цилиндре, включая:

1. Систематическое исследование линейных режимов пульсационных течений в зависимости от параметров либрации и геометрии торцевых стенок (параллельное и антипараллельное расположение торцов при различных значениях угла наклона). Развитие методики измерений и механизмов генерации волновых аттракторов, построение карты режимов течения.
2. Показано, что инерционные волны индуцируют осредненную азимутальную и меридиональную циркуляцию жидкости. Механизм генерации течений связан с нелинейными эффектами в динамических пограничных слоях на стенках полости. Установлено, что скорость осредненного движения жидкости квадратично зависит от амплитуды либраций.

3. Проведено исследование устойчивости осредненного азимутального течения и надкритической динамики жидкости. Показано, что потеря устойчивости течения при больших амплитудах либраций обусловлена развитием триадного резонанса инерционных волн. Обнаружено, что в условиях триадного резонанса генерируется осредненная система азимутально-периодических валов.

Основные содержание диссертационной работы, ее главные научные результаты опубликованы в 4-х статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ и индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science. Все результаты, представленные в диссертации, являются новыми и важными для развития механики вращающихся жидкостей. Основные выводы, сделанные в диссертации, подтверждаются сравнением с известными экспериментальными и теоретическими работами. Личный вклад автора заключается в непосредственном проведении экспериментальных исследований, участии в обработке и анализе полученных результатов.

**Практическое значение диссертации** определяется широкими возможностями использования инерционных волн для управления перемешиванием жидкостей в технологических процессах, когда системы с классической механической мешалкой использовать затруднительно или невозможно.

**Замечания и пожелания:**

1. В диссертации процитирована работа Favier & Le Dizès (JFM 2024), в которой для неосесимметричной полости введено понятие «супер-аттрактор» и выполнено численное моделирование для линейного режима движения. Рассматриваемая диссертация является по сути пионерным экспериментальным исследованием нелинейной динамики системы, допускающей существование супер-аттрактора. Это можно было подчеркнуть в качестве обоснования значимости проведенного исследования
2. При исследовании нестационарной модуляции амплитуд дочерних волн в режиме триадного резонанса на больших промежутках времени (рис. 3.6), может быть полезно использование подходов, развитых в работе Grayson K.M., Dalziel S.B., Lawrie A.G.W. The long view of triadic resonance instability in finite-width internal gravity wave beams // Journal of Fluid Mechanics. 2022. V. 953, A22. doi:10.1017/jfm.2022.914
3. В литературе топографический  $\beta$ -эффект как правило обсуждается для систем с осевой симметрией. В диссертации было бы уместно обсуждение возможности появления данного эффекта для изучаемой геометрии с параллельными и антипараллельными конфигурациями наклонных торцов полости.



Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация написана ясным научным языком, хорошо структурирована и оформлена. Автореферат соответствует установленным требованиям и полностью отражает основное содержание диссертации.

**Заключение.** Диссертация Ширяевой Марии Андреевны «Экспериментальное исследование инерционно-волновых режимов течений жидкости в неравномерно вращающемся цилиндре» является законченной научно-квалифицированной работой, посвященной актуальной тематике и выполненной на высоком уровне. Диссертационная работа соответствует требованиям ВАК РФ и критериям, установленным действующим «Положением о присуждении ученых степеней», а ее автор Ширяева Мария Андреевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв ведущей организации обсужден и одобрен на заседании семинара ИГиЛ СО РАН «Прикладная гидродинамика» под руководством чл.-корр. РАН В.В. Пухначева и д.ф.-м.н. Е.В. Ерманюка 13.11.2024, протокол № 29.

Отзыв подготовил главный научный сотрудник,  
и.о. заведующего лабораторией волновых  
процессов в неоднородных средах ИГиЛ СО РАН  
доктор физико-математических наук, доцент  
(специальность 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»)



А.А. Чесноков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН)

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, д. 15

Телефон: +7 383 333 1612

Адрес электронной почты: [igil@hydro.nsc.ru](mailto:igil@hydro.nsc.ru)

Адрес официального сайта в сети «Интернет»: <https://www.hydro.nsc.ru/>