

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 12.12.2024 № 140

О присуждении Ширяевой Марии Андреевны, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Экспериментальное исследование инерционно-волновых режимов течений жидкости в неравномерно вращающемся цилиндре» по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 10.10.2024, протокол № 136, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018.

Соискатель Ширяева Мария Андреевна 1992 г. рождения, в 2018 г. окончила магистратуру ФГБОУ ВО "Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет" (ПГГПУ) по направлению подготовки «Педагогическое образование». В 2024 г. окончила аспирантуру очной формы обучения в ФГБОУ ВО "Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет" по научной специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы. В настоящее время работает младшим научным сотрудником лаборатории вибрационной гидромеханики ПГГПУ. Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО "Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет".

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики и технологии физического факультета ПГГПУ Козлов Виктор Геннадьевич.

Официальные оппоненты:

1. Сухановский Андрей Николаевич, доктор физико-математических наук (01.02.05), заведующий лабораторией турбулентности Института механики сплошных сред ФГБУН "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук", г. Пермь;
 2. Вергелес Сергей Сергеевич, кандидат физико-математических наук (01.04.02), доцент, научный сотрудник сектора физики неравновесных состояний ФГБУН "Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН", г. Черноголовка;
- дали положительные отзывы на диссертацию

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук" (ИГиЛ СО РАН), г. Новосибирск, в своем положительном заключении, составленным главным научным сотрудником д.ф.-м.н., доцентом Чесноковым А.А., и.о. заведующего лабораторией волновых процессов в неоднородных средах, и утвержденном

директором ИГиЛ СО РАН, д.ф.-м.н. Ерманюком Е.В., указала, что диссертация является законченной научно-исследовательской работой, выполненной соискателем самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне в области экспериментального исследования методов вибрационного перемешивания жидкостей во вращающихся полостях. Результаты исследований могут использоваться в промышленности в качестве инструмента для эффективного управления тепло- и массопереносом. Выполненные экспериментальные исследования важны для развития теории гидродинамики вращающихся систем. Постановка задачи позволяет успешно моделировать линейные и нелинейные режимы аттракторов инерционных волн и мод, которые наблюдаются в реальных гео- и астрофизических системах.

Представленная диссертационная работа «Экспериментальное исследование инерционно-волновых режимов течений жидкости в неравномерно вращающемся цилиндре» по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Ширяева Мария Андреевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Соискателем опубликовано 4 статьи в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. Subbotin S., **Shiryaeva M.** Steady vortex flow induced by inertial wave attractor in a librating cylinder with sloping ends // Microgravity Science and Technology. 2022. Vol. 34. Art. id. № 89. (WoS, ВАК, Scopus, Q2).

В работе представлены экспериментальные результаты изучения линейных режимов аттрактора и инерционной моды в зависимости от угла наклона торцевых стенок цилиндрической полости и параметров либраций, приведен сравнительный анализ с двумерной невязкой моделью. Подробно описана методика измерения мгновенных и осредненных полей скорости в быстровращающейся полости. Показано, что инерционные волны генерируют осреднённую азимутальную и меридиональную циркуляцию, которая определяется амплитудой модуляции скорости.

2. Subbotin S., **Shiryaeva M.** Inertial wave beam path in a non-uniformly rotating cylinder with sloping ends // Microgravity Science and Technology. 2023. Vol. 35. Art. id. № 32. (WoS, ВАК, Scopus, Q2).

В работе исследована пространственная структура резонансных инерционно-волновых режимов, описаны законы масштабирования скорости и ширины сдвигового слоя в зависимости от числа Экмана. Представлены результаты исследования нелинейного режима симметричного отражения инерционных волн.

3. Субботин С.В., **Ширяева М.А.** Экспериментальное исследование линейного и нелинейного режимов аттракторов инерционных волн во вращающемся цилиндре с неосесимметричными торцами // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64, №. 2. С. 85-94. (WoS, ВАК, Scopus, Q3).

В работе представлено экспериментальное исследование линейного и нелинейного режимов аттрактора инерционных волн в неравномерно вращающемся цилиндре. Показано, что скорость пульсационного течения немонотонно меняется с изменением

частоты и достигает максимального значения, когда аттрактор принимает форму квадрата. Выполнен Фурье-анализ возмущений в надкритическом режиме и показано, что в спектре помимо основной частоты присутствуют две дополнительные гармоники, удовлетворяющие условию триадного резонанса.

4. **Shiryaeva M.A.**, Subbotin S.V., Subbotina M.S. Linear and non-linear dynamics of inertial waves in a rotating cylinder with antiparallel inclined ends // Fluid Dynamics and Materials Processing. 2024. Vol. 20, №. 4. P. 787-802. (WoS, BAK, Scopus, Q4).

В работе представлено экспериментальное исследование резонансных линейных и нелинейных инерционно-волновых режимов в неравномерно вращающейся цилиндрической полости с непараллельными наклонными торцами. Обнаружены три различных режима: волновой аттрактор, глобальные инерционные моды и режим симметричного отражения волновых лучей. Инерционные волны генерируют осреднённую азимутальную циркуляцию в виде вытянутого вдоль оси вращения вихря. Положение вихря и направление закрутки определяется расположением зоны отражения волновых лучей от наклонных границ. В нелинейных режимах одновременно обнаруживаются несколько пар субгармоник триадного резонанса. Неустойчивость триадного резонанса сопровождается периодической генерацией средних вихрей в азимутальном направлении.

Публикации содержат в сумме 56 страниц и в полной мере отражают основные научные результаты работы. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Сухановского А.Н. В отзыве представлен анализ содержания диссертации, отмечается актуальность темы диссертации; отмечены новизна, научная и практическая значимость и достоверность полученных результатов, а также достоинства. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- вопрос о том, в чем состоит преимущество или принципиальное отличие либрационного способа воздействия по сравнению прецессией или вращением наклонной крышки;
- вопрос о сравнении бета-эффекта для случаев параллельного и антипараллельного расположения торцов;
- вопрос об уточнении рассчитываемой скорости пульсационного течения;
- вопрос о том, почему значения максимумов средней по пространству скорости пульсационного течения отличаются за время одно периода либраций;
- замечание о том, что не указаны погрешности измерений;
- замечание о наличии в тексте диссертации опечаток и несогласований.

2. Положительный отзыв официального оппонента Вергелеса С.С. В отзыве отмечено, что динамика вращающейся жидкости является предметом исследований и неугасающего интереса, поскольку такой тип течений встречается как в природе, так и используется в технике. Отмечается, что исследование проведено на весьма высоком уровне, его отличительными особенностями являются систематичность и всесторонность; представлен анализ содержания диссертации, отмечается актуальность и новизна. Оппонент отмечает следующие замечания:

- замечание о необходимости отметить аналогию между осреднёнными течениями, генерируемыми инерционными волнами и акустическими течениями, порождаемыми звуковыми волнами, и приповерхностными вихревыми течениями, порождаемыми поверхностными волнами;
- замечание о том, что в тексте не прокомментирована модуляция периодом либраций пиков скорости на графике рисунка 2.6в;
- вопрос по физической интерпретации фотографии структуры течения, представленной на рисунке 3.1.

3. Положительный отзыв ведущей организации ФГБУН ИГиЛ СО РАН. В отзыве отмечается, что диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в области экспериментального исследования инерционных волн и выполненной на высоком уровне. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и существенную практическую значимость в связи с возможностью использования инерционных волн в качестве инструмента для перемешивания жидкостей. Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- замечание о необходимости сравнения результатов диссертации с результатами работы Favier & Le Dizès (JFM 2024), в которой для неосесимметричной полости введено понятие «супер-аттрактор»;
- рекомендация об использовании для анализа дочерних инерционных волн в режиме триадного резонанса на больших промежутках времени подходов, развитых в работе Grayson K.M. et al. J. Fluid Mech. 2022. V. 953, A22;
- замечание о необходимости обсуждения топографического бета-эффекта в геометрии с параллельным и антипараллельным наклоном торцов.

На автореферат поступило 5 отзывов:

1. Положительный отзыв от Демина В.А., д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой теоретической физики ФГАОУ ВО "Пермский государственный национальный исследовательский университет", г. Пермь (2 замечания);
2. Положительный отзыв от Жиленко Д.Ю., к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника лаборатории экспериментальной гидродинамики НИИ механики ФГБОУ ВО "Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова", г. Москва (2 замечания);
3. Положительный отзыв от Минакова А.В., д.ф.-м.н., директора Института инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет", г. Красноярск (2 замечания);
4. Положительный отзыв от Перминова А.В., д.ф.-м.н., доцента, заведующего кафедрой общей физики ФГАОУ ВО "Пермский национальный исследовательский политехнический университет", г. Пермь (3 замечания);
5. Положительный отзыв от Черданцева А.В., д.ф.-м.н., заведующего лабораторией моделирования ФГБУН "Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН", г. Новосибирск (без замечаний).

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- замечание, связанное с тем, что положение №4, выносимое на защиту, необходимо было представить в виде обобщающих слов, а не математических оценок;
- замечание о том, что в списке публикаций автора необходимо было отметить только те

работы в рецензируемых изданиях, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертационного исследования;

- замечание о том, что положения №3 и 5, выносимые на защиту, является избыточными, необходимо было подобрать более конкретные формулировки;
- вопрос о необходимости использования термина «либрации» вместо «вибрации»;
- замечание о том, что необходимо давать расшифровки терминов и понятий, используемых в диссертации, сразу после их первого упоминания;
- замечание о том, что пик вблизи частоты на рис. 2 никак не прокомментирован;
- вопрос о том, являются ли эффекты, характерные для инерционных волн, универсальными и, например, проявляются в оптике.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области физической гидродинамики, имеют большое число публикации с результатами теоретических и экспериментальных работ; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ФГБУН "Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук", г. Новосибирск, является одним из ведущих научных центров в области физической гидродинамики. Основные направления научной деятельности Института: математические проблемы механики сплошных сред; физика и механика высокоэнергетических процессов; механика жидкостей и газов; механика деформируемого твердого тела. По данным направлениям Институт проводит фундаментальные исследования и участвует в разработке научных основ современной техники и технологии. Институт выпускает печатные издания: сборник научных трудов "Динамика сплошной среды" и два переводных журнала "Прикладная механика и техническая физика" и "Физика горения и взрыва", включенные в международные базы WoS и Scopus. Отзыв ведущей организации, содержащий подробную, по главам, характеристику содержания диссертационной работы; высокую положительную оценку актуальности темы исследования, достоверности, новизны, теоретической и практической значимости изложенных результатов обсужден и одобрен на научном семинаре ИГиЛ СО РАН "Прикладная гидродинамика" № 29 от 13.11.2024 г. в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана методика экспериментального изучения полей пульсационных и осредненных скоростей в полостях, совершающих модулированное вращение;

предложено объяснение механизмов генерации осредненных потоков при возбуждении инерционных мод и потери их устойчивости;

доказана возможность фокусировки инерционных волн на замкнутую траекторию благодаря наличию в полости наклонных к оси вращения стенок;

введена классификация режимов инерционно-волновых течений в неравномерно вращающихся цилиндрических полостях.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:
доказано, что структура инерционно-волновых колебаний и генерируемых осредненных потоков во вращающейся полости качественно изменяются в зависимости от амплитуды и относительной частоты либраций и определяются формой торцов полости;

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):

использован комплекс экспериментальных методов исследования течений во вращающихся системах и численных методов обработки экспериментальных результатов;

изложены результаты исследования резонансных инерционно-волновых режимов в полостях различной формы, совершающих модулированное вращение;

раскрыты особенности нелинейной динамики жидкости в условиях резонансного отклика вращающейся гидродинамической системы на модуляцию скорости вращения;

изучены структура и интенсивность вторичных (осредненных) потоков жидкости в неравномерно вращающихся полостях, а также устойчивость осредненных потоков в зависимости от управляющих безразмерных параметров;

проведена модернизация экспериментальных стендов и кювет для исследования линейной и нелинейной динамики различных режимов инерционных волн.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработана и внедрена программа для моделирования эффектов фокусировки инерционных волн (волновых аттракторов) во вращающейся цилиндрической полости в рамках двумерной модели трассировки волновых лучей;

определены механизмы возбуждения и области проявления различных режимов инерционно-волновых течений: фокусировки волновой энергии на замкнутую траекторию (волновой аттрактор) и крупномасштабных осциллирующих вихрей (инерционных мод);

создана экспериментальная установка для исследования инерционных волн и осредненных течений в неравномерно вращающихся полостях;

представлены карты режимов инерционно-волновых и осредненных течений в зависимости от безразмерной частоты либраций, а также угла и направления наклона торцевых стенок.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:
для экспериментальных работ: исследования проведены с применением современного оборудования и современных экспериментальных методов, что позволило обеспечить воспроизводимость и высокую точность полученных результатов;

идея базируется на анализе и обобщении результатов теоретических и экспериментальных исследований особенностей инерционно-волновых процессов во вращающихся гидродинамических системах;

использованы современные методы сбора и обработки исходной информации, оконное преобразование Фурье для анализа пульсационных полей скорости жидкости; проведено сравнение авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике;

установлено хорошее соответствие частот возбуждения инерционных мод в цилиндрах с наклонными торцами с результатами теоретического расчета инерционных мод во

вращающихся прямых цилиндрах.

использованы экспериментальные методы и оборудование, обеспечивающие высокую точность и повторяемость результатов измерений.

Личный вклад соискателя состоит в проведении экспериментальных исследований, изложенных в диссертации, а также их последующая обработка. Постановка задач, обсуждение и анализ результатов осуществлены совместно с научным руководителем В.Г. Козловым и соавтором публикаций С.В. Субботиным.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней" № 842, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г.: в ней содержится решение задачи о разработке новых экспериментальных методов управления тепло- и массопереносом во вращающихся полостях посредством инерционных волн. В частности, возбуждение резонансных инерционных колебаний жидкости сопровождается генерацией интенсивных осреднённых течений, обеспечивающих быстрое и равномерное перемешивание, в том числе высоковязких компонентов, что может найти практическое применение в технологических процессах различных промышленных отраслей.

На заседании 12 декабря 2024 г. диссертационный совет принял решение присудить Ширяевой М.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введено на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета Д 004.036.01
д.т.н., профессор, академик РАН
Матвеев Валерий Павлович

 / Матвеев В.П.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 004.036.01
д.ф.-м.н., доцент
Зуев Андрей Леонидович

 / Зуев А.Л.


М.П.

13 декабря 2024 г.