

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента**  
**на диссертационную работу Ширяевой Марии Андреевны**

**«Экспериментальное исследование инерционно-волновых режимов течений жидкости в неравномерно вращающемся цилиндре», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы**

Динамика вращающейся жидкости уже долгое время является предметом исследований и неугасающего интереса, поскольку такой тип течений встречается как в природе, так и используется в технике. Течение быстро вращающейся жидкости можно разделить на две компоненты. Первой компонентой являются инерционные волны, совершающие колебаний под действием силы Кориолиса. Второй компонентой является геострофическое течение, у которого поле скорости однородно вдоль оси вращения жидкости. Нелинейность приводит к взаимодействию волн между собой, а также с геострофическим течением. В частности, предметом отдельного исследования является процесс порождения геострофического течения инерционными волнами.

Данная диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию генерации инерционных волн в сосудах сложной геометрии в линейном и слабо нелинейном режимах, а также последующей генерации среднего течения инерционными волнами. Исследование проведено на весьма высоком уровне. Его отличительными особенностями являются систематичность и всесторонность. Сочетание существующего научного интереса к динамике вращающейся жидкости и добротности диссертационного исследования делают это исследование несомненно актуальным.

В Главе 1 диссертации дан обзор полученных на данный момент результатов о динамике вращающейся жидкости в замкнутых сосудах. Показывается, что в замкнутых вращающихся полостях, заполненных несжимаемой слабовязкой жидкостью, существует два типа собственных мод инерционных колебаний жидкости. Первый тип мод имеет поле скорости с кинетической энергией, распределённой почти равномерно по всему объёму полости. Второй тип мод представляет собой волновой аттрактор, занимающий малый объём по сравнению с объёмом всей полости. Далее проводится краткий обзор нелинейных эффектов, включая распад инерционной волны на две другие вследствие триадного волнового резонанса и генерацию осреднённого течения вследствие нелинейного взаимодействия с инерционной волной в вязком пограничном слое. На основании проведённого обзора убедительно показывается обоснованность выбора в качестве полости цилиндра с косыми торцами, поскольку в такой полости следует ожидать как возникновение волновых аттракторов, так и их локализацию в азимутальном направлении.

В Главе 2 производится систематическое исследование генерации инерционных мод в линейном режиме вследствие либрации цилиндра – модуляции его скорости вращения во времени. Волна возбуждается на частоте либрации, что позволяет контролировать модальную структуру возбуждаемых мод. Исследуются полости с разными углами наклона торцов. Показывается, что волновые аттракторы возникают только при достаточно большом угле наклона косых торцов цилиндра. Исследуется зависимость ширины волнового пучка в аттракторе в зависимости от числа Экмана. Измерения скорости

производятся как в плоскости, параллельной оси цилиндра, так и в ортогональной ей плоскости. Измерения в ортогональной плоскости позволяют показать локализацию аттрактора в азимутальном направлении. Выделяются осреднённые течения. Показывается, что они почти однородны вдоль оси вращения, а их амплитуда квадратична по амплитуде инерционных колебаний. Следует также отметить, что результаты и анализ измерений предваряются описанием методики измерения, разработка которой также является результатом данной диссертации.

В Главе 3 исследуется режим нелинейной генерации инерционных мод. На основании полученных экспериментальных данных для разных типов мод подробно демонстрируется реализация триадного резонанса. Показывается, что для определённых мод находится более одной триады, так что их распад происходит на более чем одну пару субгармоник. Нелинейное взаимодействие основной моды с субгармониками приводит к разрушению среднего течения, существовавшего при более низкой амплитуде накачки, когда субгармоники не возбуждались. В присутствии субгармоник медленное течение перестаёт быть постоянным. В этом режиме проведены измерения скорости азимутального дрейфа структур медленного течения.

Научная новизна проведённого исследования состоит в систематическом исследовании линейной и нелинейной динамики жидкости во вращающейся вокруг своей оси и либрирующей цилиндрической полости с косыми торцами. Для измерения поля скорости камерой, неподвижной в лабораторной системе координат, был разработан оригинальный метод. Были обнаружены три типа инерционных мод: инерционная волна, волновой аттрактор и диагональная мода. Впервые экспериментально исследована зависимость толщину аттрактора от числа Экмана. Показано, что линейные моды генерируют среднее течение за счёт нелинейности в пограничных вязких слоях, которое становится неустойчивым после достижения порога генерации мод-субгармоник.

Мои замечания по диссертационной работе следующие:

1. На мой взгляд, в Главе 1 следовало бы упомянуть прямую аналогию генерации осреднённых течений инерционными волнами благодаря их нелинейному взаимодействию в вязких пограничных слоях с акустическими течениями, порождаемыми звуковыми волнами, и с приповерхностными вихревыми течениями, порождаемыми поверхностными волнами. Эта аналогия показывает, в том числе, общефизическую значимость исследованного в диссертационной работе феномена.
2. На графике Рисунка 2.6в видно, что на один период колебаний угловой координаты приходится два периода колебаний квадратного корня из кинетической энергии течения, которые промодулированы основным периодом. В тексте диссертации это обстоятельство никак не обсуждается. Из контекста можно сделать предположение, что эта картина является следствием интерференции колебательного и среднего течения жидкости.
3. В обсуждении в Рисунке 3.1 говорится: “Области с повышенной концентрацией частиц, где жидкость совершает циклоническое или антициклоническое вращение, хорошо отделены друг от друга.” Но ранее, во Введении, было сказано, что для визуализации течения используются частицы нулевой плавучести. Поскольку частицы полностью увлекаются потоком несжимаемой жидкости, то это означает, что в процессе течения не могут создаваться области с повышенной и пониженной концентрациями частиц. По-видимому, Рисунок 3.1

является результатом съёмки с увеличенной выдержкой. Там, где течение слабо, частицы остаются на месте в течении всего времени выдержки, поэтому они оставляют значительно меньше следа на фотографии, чем движущиеся частицы в областях с сильным течением.

Эти замечания не снижают достоинств диссертации, которой я даю сугубо положительную оценку. Диссертация выполнена на высоком уровне, отвечающем критериям ВАК. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в четырёх журналах, входящих в перечень ВАК, в том числе трёх международных изданиях. Работа прошла апробацию. Её результаты доложены на 11-ти конференциях и опубликованы в шести сборниках трудов.

Ключевая роль личного вклада автора диссертации несомненна. Наряду с полноценным участием в постановке экспериментальных задач и формулировкой выводов, Ширяева М.А. проделала большую работу по выработке метода измерения поля скорости и всестороннего анализа полученных данных. В результате исследуемые физические феномены получили в диссертации всестороннее практически исчерпывающее описание.

Итак, могу с уверенностью констатировать, что кандидатская диссертация Ширяевой М.А. представляет собой законченное научное исследование, которое соответствует всем критериям, установленным п. 9 положения о порядке присуждения учёных степеней № 842 от 24.09.2013 г., а её автор, Ширяева Мария Андреевна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Научный сотрудник  
ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, к.ф.-м.н.  
142432, г. Черноголовка Московской области,  
просп. Академика Семенова, д. 1А  
тел: +7(495)702-93-17, e-mail: [ssver@itp.ac.ru](mailto:ssver@itp.ac.ru)

Вергелес Сергей Сергеевич  
25 ноября 2024 г.

Подпись Вергелеса Сергея Сергеевича заверяю,  
Учёный секретарь  
ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, к.х.н.



Крашаков Сергей Александрович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук, 142432, г. Черноголовка Московской области, просп. Академика Семенова, д. 1А, тел: +7(495)702-93-17, сайт: <https://www.itp.ac.ru/>, e-mail: [office@itp.ac.ru](mailto:office@itp.ac.ru)