

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН»,  
член-корреспондент РАН



Коновалов С.К.

«3» сентября 2020 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Федерального исследовательского центра

«Морской гидрофизический институт РАН»

на диссертационную работу

**Чаплиной Татьяны Олеговны**

«Перенос вещества в вихревых и волновых течениях в однокомпонентных и многокомпонентных средах»,

представленную на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН).

**Актуальность темы работы.** Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию и разработке теоретического описания динамики и структуры многофазных вихревых течений и переноса трех типов маркеров: твердотельных (льда, пластика), несмешивающихся с водой (нефть, масло, дизельное топливо) и растворимых (анилиновые красители, уранил). Вихревые течения наблюдаются в естественных воздушных потоках (торнадо и тайфун) и широко используются в различных технических приложениях, таких как аэроавиатика, теплообмен, струйное осушение, сепарация, обогащение, горение и т.д.

Исследование вихревых течений представляет большой интерес в

научном плане, поскольку в них имеют место различные физические эффекты, в том числе нелинейность, сингулярность, неустойчивость, генерация организованных (когерентных) образований.

Актуальность темы диссертации обосновывается необходимостью разработки аналитической и физической моделей процессов переноса различных примесей в многофазных вихревых течениях для решения физических, гидрофизических и экологических проблем.

**Структура и содержание работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 136 наименований. Объем диссертации составляет 275 страниц текста, включая 27 таблиц и 116 рисунков.

Во *введении* обоснована актуальность темы исследования, приведена информация о степени ее разработанности, сформулированы цель работы и ее научная новизна. Приведены основные результаты работы, их теоретическая и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, и изложено краткое содержание диссертации по главам.

*В первой главе* приводятся основы теории вихревых течений в жидкости со свободной поверхностью и требования к экспериментам по изучению процессов переноса вещества в установившемся вихревом течении. Дается описание экспериментальных установок, используемых для моделирования вихревых течений, описано оборудование, методика лабораторных экспериментов и параметры изучаемых течений.

Также в главе 1 рассмотрена общая модель вихря в цилиндрическом контейнере, выполнены экспериментальные исследования вихревых течений в контейнерах различной геометрии, а также при различных физических параметрах экспериментов, определены формы каверны составного вихря в чистой воде, геометрия поверхностной каверны и критические условия перестройки течения в составном вихре.

Автором диссертации получена теоретическая зависимость, которая описывает универсальную геометрию вихревых каверн, возникающих в цилиндрических сосудах при вращении соосного диска, хорошо согласующаяся с экспериментальными данными. Впервые получены аналитические выражения, показывающие, что траектории жидких частиц вблизи поверхности вихря представляют собой трехмерные спирали, по которым происходит движение от периферии к центру вихря. Показано, что рассчитанные и визуализированные траектории жидких частиц хорошо согласуются между собой и относятся к классу пространственных логарифмических спиралей.

Положительная особенность этой части работы – это комплексный подход к исследованию вихревых течений: лабораторное моделирование и аналитическое описание. Хорошее совпадение форм свободной поверхности, описываемых аналитическими соотношениями, с экспериментально наблюдаемыми при различных параметрах вихревого течения, указывает на применимость развитого в представленной работе упрощенного теоретического описания течения данного вида.

*Вторая глава* посвящена исследованию поведения растворимых примесей на поверхности и в толще вихревых течений. По мере роста экономики и развития производства в природную среду попадает все большее количество химически активных веществ и соединений, в том числе экологически опасных, которые попадают и в воздушный бассейн, и в гидросферу. Для контроля уровня загрязненности и обеспечения экологической безопасности или даже для планирования эвакуации людей необходимо оценивать характеристики переноса вещества из компактного источника в сложившихся гидрометеорологических условиях. *Во второй главе* представлены результаты экспериментальных исследований переноса растворимой примеси из компактного пятна на свободной поверхности жидкости внутри покоящейся или вовлеченной в составное вихревое

движение жидкости, а также проведена визуализация и качественный анализ течения вблизи кромки диска.

Автором показано, что вдоль свободной поверхности вихревого течения жидкие частицы движутся по спиральным траекториям, в то же время перенос жидких частиц в толщу жидкости происходит по винтовым нисходящим траекториям, радиус которых слабо изменяется вдоль вертикали. Рассчитана скорость изменения опускания красителя в толщу жидкости в зависимости от частоты вращения индуктора.

Все измеренные спиральные структуры наиболее точно аппроксимируются логарифмическими функциями. Таким образом, установлено, что характерные особенности вихревого течения задаются в области пограничного слоя на диске и затем переносятся с сохранением формы структуры течения во всю область, занимаемую жидкостью. Это подтверждается совпадением типов спирального движения жидких частиц на поверхности и вблизи диска.

Проведенные в данной главе исследования важны для понимания механизмов распространения примеси в сложных вихревых структурах. Используемая в диссертации методика позволила получить результаты, пригодные для дальнейшего изучения вихревых структур.

*В третьей главе* представлены результаты экспериментальных исследований переноса несмешивающейся примеси (касторовое, подсолнечное, машинное и авиационное масла), а также дизельного топлива, нефти, мазута и др. на свободной поверхности и в толще вовлеченной в вихревое движение жидкости, включая режим формирования эмульсий. Разработана методика исследования распространения различных примесей в вихревых течениях, позволяющая проводить эксперименты в чистой, в соленой воде, а также в воде с содержанием углеводов и спирта.

Получены зависимости, отражающие форму границ раздела фаз в вихревом течении жидкости, состоящей из двух компонент. Полученная аналитически форма нулевого приближения для вихря, образованного

вращением внутри цилиндрического контейнера, с заданным объёмом легкой несмешивающейся примеси на её поверхности, показывает хорошее совпадение с экспериментальными данными во всем исследованном диапазоне параметров эксперимента, что свидетельствует в пользу применимости предложенного представления формы границ раздела фаз.

В Главе 3 также было проведено исследование устойчивости поверхности раздела вода – масло в составном вихре, включая формирование эмульсий, определены характерные формы и условия перестройки режимов течения.

*Четвертая глава* посвящена проблеме визуализации вихревых течений путем внесения в движущуюся жидкость различного рода маркеров, а также проблеме измерения характеристик течения на основе наблюдаемых перемещений маркеров. Приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований динамики твердотельных маркеров разных форм и размеров в вихревом течении в многофазных жидкостях и предложена теоретическая модель, объясняющая движение маркеров, помещенных на поверхность вихревого течения в однокомпонентной жидкости.

Визуализация течения жидкости, определение гидродинамических характеристик, в частности, скорости, путем внесения в течение различных маркирующих предметов были и остаются важными задачами для исследователей. Однако, помещаемые в движущуюся жидкость различные объекты ведут себя по-разному в силу присущих им физических и химических свойств и при описании их движения необходимо вводить поправки, учитывающие взаимодействие среды с объектом. Применительно к геофизике такие поправки могут оказаться полезными, например, при исследованиях, связанных с проблемой накопления пластикового мусора в центрах вихревых образований в открытом океане, а также для корректировки показаний различных зондов-дрифтеров, передающих информацию о морских и океанских течениях.

Положительная особенность этой части работы – это также комплексный подход к изучению перемещения твердотельных маркеров в вихревых течениях: лабораторное моделирование и аналитическое описание. Получено уравнение, описывающее движение центра масс маркера и представляющее логарифмическую спираль на поверхности вихревой воронки, которая совпадает с траекториями жидких частиц вблизи свободной поверхности. Экспериментальная зависимость угла вращения от угла поворота в области вращения твердого тела хорошо согласуется с теоретической зависимостью, полученной на основе предложенной математической модели.

*Пятая глава* посвящена моделированию разлива углеводородов на поверхности воды. В последние годы различными государствами большие усилия прилагаются к усовершенствованию систем предупреждения и ликвидации последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, но проблема все же остается актуальной. Для снижения возможных негативных последствий особого внимания требует изучение способов локализации, ликвидации разливов нефтепродуктов и разработки дополнительного комплекса мероприятий по сбору и утилизации углеводородов, попавших во внешнюю среду. Автором приводятся результаты исследования процесса растекания углеводородов с различными физико-химическими свойствами по поверхности воды, а также сравнение полученных аналитически выражений, описывающих установившуюся форму поверхности пятна углеводородов на поверхности воды, с наблюдаемыми в экспериментах формами для различных значений параметров эксперимента.

Также в главе 5 предложен оригинальный способ ликвидации разливов углеводородов с помощью природного сорбента – натуральной овечьей шерсти. В данной главе изучен эффект формирования течений в покоящейся жидкости при сорбции нефтепродуктов и масел на волокнистых материалах, и в частности натуральной овечьей шерсти. Автором диссертационной работы было получено 2 Патента на полезную модель №136453, «Устройство

для отделения жидких углеводородов от воды» и № 169140 «Устройство для сбора жидких углеводородов». Проведенная флуоресцентная диагностика очищенной от нефтяных загрязнений воды сорбентом на основе овечьей шерсти, показала, что шерсть эффективно сорбирует загрязнения и может успешно применяться для ликвидации поверхностных разливов различных углеводородов на водных объектах в двух режимах: с надводного судна и с берега водоема. Основным преимуществом разрабатываемого устройства для сбора жидких углеводородов с поверхности воды является сравнительно низкая себестоимость и экологическая безопасность его использования.

### **Новизна исследования и полученных результатов.**

Научную новизну составляют следующие положения, выносимые на защиту:

Разработанная методика экспериментальных исследований динамики формирования, структуры установившего течения и картины переноса вещества в вихревых и волновых течениях в широком диапазоне определяющих параметров.

Результаты экспериментальных исследований динамики и структуры многофазных вихревых течений и характера переноса трех типов маркеров: твердотельных (льда, пластика), несмешивающихся с водой (нефть, масло, дизель) и растворимых (анилиновые красители, уранил).

Результаты экспериментальных исследований тонкой структуры поверхностей раздела нефтяное тело – вода и жидкость (вода или несмешивающиеся углеводороды) – воздух в составном вихре, включая режим начала формирования эмульсий.

Теоретическая модель, которая описывает универсальную геометрию вихревых каверн, показывающая, что траектории жидких частиц как вблизи поверхности вихря, так и относительно поверхности диска, представляют собой трехмерные логарифмические спирали, по которым происходит течение от периферии к центру вихря.

Аналитическая модель определения формы масляного тела в составном вихре, полученная на основе анализа уравнений механики разноплотностных жидкостей с физически обоснованными граничными условиями.

Теоретическая модель, описывающая движение маркеров, имеющих центральную симметрию, помещенных на поверхность вихревого течения и подтверждающая экспериментальные наблюдения.

Научная новизна диссертационных исследований подтверждается публикациями в ведущих научных журналах РАН и зарубежных изданиях квартилей Q1 и Q3, а также получением автором трех патентов на полезные модели и изобретение.

#### **Обоснованность и достоверность результатов.**

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается корректной постановкой задач, подтверждается воспроизводимостью результатов в пределах точности эксперимента, согласием результатов проведенных экспериментов с данными независимых опытов в диапазоне совпадения параметров, а также удовлетворительным согласием с расчетами по моделям, основанным на фундаментальных уравнениях механики жидкостей, а также сравнениями с результатами других авторов.

#### **Практическая значимость полученных результатов.**

Результаты диссертационной работы важны для лучшего понимания поведения различных примесей в вихревых течениях и более точного прогнозирования их распространения в природных условиях (в гидросфере и атмосфере), а также создают основу для разработки обоснования выбора признаков перехода природных процессов в катастрофические состояния и локализации областей максимальной интенсивности протекающих процессов. Помимо фундаментального основания, данная работа имеет определенную прикладную направленность. Результаты исследований могут быть применены для усовершенствования многочисленных установок по разделению водонефтяных смесей и способов сохранения качества



окружающей среды. Результаты, приведенные в данной диссертационной работе, неоднократно докладывались автором на международных и российских конференциях.

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертации.**

Проведенные в работе Чаплиной Т.О. исследования динамики и структуры многофазных вихревых и волновых течений и характера переноса в них примесей могут быть использованы для моделирования процессов переноса различных примесей в вихревых течениях, а также при интерпретации показаний различных зондов-дрифтеров, передающих информацию о морских и океанских течениях.

Результаты проведенных исследований соответствуют решению задач по развитию технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения. Эффект формирования течений в покоящейся жидкости при сорбции нефтепродуктов и масел на волокнистых материалах, и, в частности, натуральной овечьей шерсти, может использоваться в технологиях ликвидации разливов углеводородов и очистки природных водоемов.

#### **Замечания по диссертации:**

1. В диссертации недостаточно подробно освещены работы других авторов по исследованию вихревых течений в натуральных условиях. В частности, такие исследования, проводились в Морском гидрофизическом институте РАН на Черном море.

2. В разделе «Практическая ценность и реализация результатов работы» не отмечены исследования автора по разработке практических методов и устройств по очистке морской поверхности от углеводородов. Ознакомление с этими работами важно для внедрения этих исследований.

3. В Главе 1 дано подробное описание экспериментальных установок, используемых для моделирования вихревых течений, дано описание методики проведения лабораторных экспериментов. Существуют многочисленные подобного рода исследования вихревых структур. Хотелось

бы, чтобы автор подчеркнул в чем состоит оригинальность и уникальность его экспериментальных установок и методик проведения экспериментов. В главе этому уделяется недостаточное внимание.

4. В Главе 3 при описании математической модели течения в составном вихре слишком лапидарно упоминается условие пренебрежения влияния вязких членов на динамику жидкости вдали от твёрдых стенок, что позволяет использовать третье уравнение системы (3.1.6). Следовало бы дать более подробное обоснование включения этого уравнения в математическую модель течения.

5. На стр. 48 формула (1.5.3) задает граничные условия – условия прилипания. При этом тангенциальная скорость жидкости у дна претерпевает скачок на кромке вращающегося диска. Скачок тангенциальной скорости в граничном условии требует обоснования с точки зрения гидродинамической устойчивости.

6. Диссертант рассматривает пограничный слой над диском, но не на неподвижных боковых поверхностях цилиндра, что требует обоснования.

7. В диссертации часто встречается термин «обечайка», но его четкого определения нет.

Отмеченные недостатки не умаляют полученные в диссертации результаты и выводы и не влияют на общую положительную оценку работы.

### **Заключение**

Диссертационная работа Т.О. Чаплиной является законченной научно-квалификационной работой, в которой выполнены исследования, имеющие важное научное и прикладное значение, и связанные с разработкой физико-математических моделей переноса вещества в вихревых течениях в однокомпонентных и многокомпонентных средах. Проведенные Т.О. Чаплиной экспериментальные и теоретические исследования динамики и структуры многофазных вихревых и волновых течений и характера переноса в них примесей можно квалифицировать как научное достижение в

области механики жидкостей, геофизике, экологии и, которое может быть использовано для моделирования процессов переноса вещества, а также с целью мониторинга и надежного прогнозирования распространения примесей в природных условиях (в стратифицированной гидросфере и атмосфере).

Результаты проведенных исследований соответствуют решению задач по развитию технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения.

Данная диссертационная работа соответствует формуле научной специальности: изучение на основе идей и подходов механики сплошной среды процессов и явлений, сопровождающих течений однородных сред при механических, тепловых и электромагнитных воздействиях; построение и исследование математических моделей для описания параметров потоков движущихся сред в широком диапазоне условий, проведение экспериментальных исследований течений и их взаимодействия с телами и интерпретация экспериментальных данных с целью прогнозирования и контроля природных явлений и технологических процессов.

Диссертация по содержанию и оформлению удовлетворяет действующим требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842. В диссертации имеются необходимые ссылки на авторов и источники заимствованных материалов, в том числе – на научные работы соискателя. Автореферат диссертации в достаточной мере отражает ее содержание и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней».

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы и удовлетворяет требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Чаплина Татьяна

Олеговна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзыв подготовлен на основании заключения совместного заседания Общеинститутского научного семинара и семинара Отдела дистанционных методов исследования Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН» от 2 сентября 2020 года, протокол №5.

Главный научный сотрудник отдела дистанционных методов исследования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН», доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Запвалов Александр Сергеевич

Ученый секретарь Общеинститутского научного семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН», кандидат физико-математических наук



Алексеев Дмитрий Владимирович