

На правах рукописи

ЧАПЛИНА Татьяна Олеговна

**ПЕРЕНОС ВЕЩЕСТВА В ВИХРЕВЫХ И ВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЯХ В  
ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ И МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕДАХ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва – 2020

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

**Официальные оппоненты:**

Ахатов Искандер Шаукатович, доктор физико-математических наук, профессор, Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий», Центр проектирования, производственных технологий и материалов, директор

Зырянов Валерий Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт водных проблем РАН", лаборатория гидродинамики, заведующий лабораторией

Носов Виктор Николаевич, доктор технических наук, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН, Отдел морских исследований, заведующий отделом

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»

Защита состоится «\_\_\_» октября 2020 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 002.240.01 при Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН по адресу: 119526, г. Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1 (ИПМех РАН).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМех РАН и на сайте ИПМех РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_» августа 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 002.240.01 при ИПМех РАН,  
кандидат физико-математических наук

Е.Я. Сысоева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию и созданию теоретического описания динамики и структуры многофазных вихревых течений и характера переноса трех типов маркеров: твердотельных (льда, пластика), несмешивающихся с водой (нефть, масло, дизельное топливо) и растворимых (анилиновые красители, уранил).

**Актуальность темы.** Изучение вихревых и волновых течений – одна из традиционных задач механики жидкости, практическая важность которой существенно выросла в последние годы. Структурные особенности вихревых течений – замкнутые или спиральные геометрии (и такие же траектории выделенных частиц), позволяют идентифицировать отдельные вихри на фоне сложных процессов и разрабатывать их теорию. Вихревые течения наблюдаются в естественных воздушных потоках (торнадо и тайфун) и широко используются в различных технических приложениях, таких как аэронавтика, теплообмен, струйное осушение, сепарация, обогащение, горение и т.д.

Исследование вихревых течений представляет большой интерес в научном плане, поскольку в них реализуются различные физические эффекты, в том числе нелинейность, сингулярность, неустойчивость, генерация организованных (когерентных) образований.

Изучение вихревых движений жидкости, начатое в основополагающей работе Гельмгольца и продолженное выдающимися учеными позапрошлого и начала прошлого века Кельвином, Прандтлем, Пуанкаре, Жуковским и др., остается актуальным, до настоящего времени, о чем свидетельствует большое количество монографий и статей.

Среди относительно недавно вышедших работ, посвященных аналитическим и численным, исследованиям вихревых течений можно назвать монографию Ф. Дж. Сэффмэна, изданную на русском языке в 2000 году, российских авторов С.В. Алексеенко, А.М. Гайфуллина, А.И. Головкина, В.М. Калявкина, П.А. Куйбина, И.В. Наумова, С.В. Нестерова, Р.И. Нигматулина, В.Л. Окулова, М.А. Соколовского, Ю.Д. Чашечкина.

Особый практический интерес представляет изучение процессов переноса вещества в атмосфере и океане. 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 необходимо оценивать перенос вещества из компактного источника в сложившихся гидрометеорологических условиях.

Рассмотрение процессов переноса вещества в таких сложных системах, какими являются природные водоемы, сопряжено со многими трудностями методического и принципиального характера: чрезвычайной сложностью проведения натурального эксперимента, сложностью и изменчивостью гидрофизических полей океана и гидрометеорологических условий во время исследований, а также в ряде случаев – сложностью и изменчивостью свойств переносимой субстанции. В этой связи особый интерес представляет изучение переноса маркеров в стационарных вихревых и волновых течениях, которые могут формироваться в лабораторных установках с неизменными внешними условиями. В этом случае можно избежать проблем, связанных с пространственной и временной изменчивостью природных источников

вихревых образований и непосредственно проследить зависимости характерных параметров течения или характеристик перемещения твердотельных или иных объектов, помещенных в течение.

**Цель диссертационной работы** – экспериментальное исследование и создание теоретического описания динамики и структуры многофазных вихревых течений и характера переноса трех типов маркеров: твердотельных (льда, пластика), несмешивающихся с водой (нефть, масло, дизельное топливо) и растворимых (анилиновые красители, уранил).

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- выполнены экспериментальные исследования вихревых течений в однородной и многофазной жидкости в контейнерах различной геометрии, а также при различных физических параметрах экспериментов. Получена теоретическая зависимость, которая описывает универсальную геометрию вихревых камер, возникающих в цилиндрических сосудах при вращении соосного диска, и совпадает как с экспериментальными данными, так и с полученной ранее моделью вихревого течения;
- проведены экспериментальные исследования переноса растворимой примеси в вихревом течении, которые подтвердили линейный характер зависимости глубины проникновения примеси вблизи вертикальной оси течения от времени. 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;
- проведены экспериментальные исследования переноса несмешивающихся примесей в вихревом течении, как в пресной, так и в соленой воде в широком диапазоне параметров, впервые рассмотрена задача аналитического определения формы масляного тела в составном вихре на основе анализа уравнений механики разноплотных жидкостей с физически обоснованными граничными условиями. Полученные зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными;
- проведены экспериментальные исследования переноса твердотельных маркеров разной формы и размеров в вихревом течении в однокомпонентной и многокомпонентной жидкости, предложена теоретическая модель, объясняющая движение маркеров, и получено уравнение, описывающее движение центра масс маркера и представляющее логарифмическую спираль на поверхности вихревой воронки;
- проведены экспериментальные исследования процесса растекания углеводородов по поверхности воды в широком диапазоне параметров, получены дифференциальные уравнения, определяющие форму масляного тела в предположении равенства угловых скоростей вращения масляного тела и окружающей жидкости (гипотеза «вмороженности масляного тела»). Получены численные решения для установившейся формы пятна углеводородов на поверхности покоящейся воды.
- проведены экспериментальные исследования сорбирующей способности различных материалов с целью их применения для ликвидации загрязнений воды углеводородами. Предложен оригинальный способ очистки водной поверхности от нефтяных загрязнений при помощи натуральной овечьей шерсти. Проведенная флуоресцентная диагностика показала, что шерсть сорбирует до 89% нефти в зависимости от ее начальной концентрации и

количества сорбента.

**Методы и подходы исследования.** Методы и подходы, использованные в ходе выполнения работы, отличаются высокой степенью оригинальности и новизны. Лабораторные эксперименты выполнялись на трех установках, позволяющих создавать стационарное вихревое течение и контролировать его параметры:

1. Установка «ВТК» (Вихревые течения с кручением) создана в лаборатории механики жидкостей ИПМех РАН для изучения закрученного потока, и входит в комплекс уникальных установок УНУ ГФК ИПМех РАН. Вихревое течение создавалось вращающимся диском, установленным на дне прозрачного цилиндрического контейнера. Для уменьшения оптических искажений контейнер помещался в открытый прямоугольный бассейн.

2. Часть экспериментов проводилась на установках для моделирования течений, вихревой поток в которых создается при помощи магнитного якоря, соединенного с мотором магнитным полем. В качестве индуктора вихревого течения используются магнитные мешалки: Intllab MS-500 и ES-6120 с подогревом. Кроме того, использовались контейнеры различной геометрии и размера. В данных экспериментах свободная поверхность оставалась открытой, что позволяет контролировать введение примеси и регистрировать тонкую структуру течения.

3. Совместно с коллегами из Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук часть экспериментов была проведена в замкнутых контейнерах круглого и квадратного сечения.

В экспериментах использовались маркеры трех типов: твердотельные (лед, пластик), несмешивающиеся с водой (нефть, масло, дизельное и авиационное топливо, глицерин) и растворимые (анилиновые красители, уранил, спирт). Была проделана серия экспериментов с твердотельными маркерами различной формы с целью выявить влияние управляемых внешних параметров на закономерности перемещения твердотельного маркера по поверхности вращающейся жидкости. Была разработана методика автоматической обработки результатов поведения маркера на свободной поверхности вихревого течения, основанная на преобразовании растрового изображения в векторное представление, которая позволяет значительно ускорить процесс обработки результатов проводимых экспериментов.

Также в работе представлены математические модели переноса различных типов маркеров в однофазных и многофазных жидкостях. Рассмотрена задача аналитического определения формы масляного тела в составном вихре на основе анализа уравнений механики несмешивающихся жидкостей разной плотности с физически обоснованными граничными условиями. Получены зависимости, отражающие форму границы раздела фаз в вихревом течении жидкости, состоящей из нескольких компонент. Считалось, что все физические поля вблизи этих поверхностей не зависят ни от времени, ни от азимутальной координаты, а эффекты поверхностного натяжения считаются малыми и не принимаются во внимание.

**Научная новизна.** В работе созданы новые и модернизированы уже имеющиеся оригинальные установки для изучения динамики формирования, структуры установившегося течения и картины переноса вещества в вихревых течениях в широком диапазоне определяющих параметров. Отработана методика сбора и обработки экспериментальных данных.

Выполнены экспериментальные исследования вихревых течений в однородной жидкости в контейнерах различной геометрии, а также при различных физических параметрах экспериментов. Результаты экспериментов позволили предположить, что форма свободной поверхности допускает группу собственных ортогональных преобразований  $SO_6(2)$ .

Проведены экспериментальные исследования переноса растворимой примеси в вихревом течении, которые подтвердили линейный характер зависимости глубины проникновения примеси вблизи вертикальной оси течения от времени. 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.

Экспериментально изучена тонкая структура поверхностей раздела нефтяное тело – вода и жидкость (вода или несмешивающиеся углеводороды) – воздух в составном вихре, включая режим начала формирования эмульсий. Представлена аналитическая модель определения формы масляного тела в составном вихре, полученная на основе анализа уравнений механики разноплотных жидкостей с физически обоснованными граничными условиями. Аналитические выражения, характеризующие форму нулевого приближения для границ раздела фаз в составном вихре, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

В работе впервые разработана 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.

Проведены экспериментальные исследования процесса растекания углеводородов из компактного пятна по поверхности воды при различных физических условиях – температуре и солёности; получены дифференциальные уравнения, определяющие форму масляного тела в предположении равенства угловых скоростей вращения масляного тела и окружающей жидкости. Получены численные решения для установившейся формы пятна углеводородов на поверхности покоящейся воды.

Проведены экспериментальные исследования переноса маркеров, помещённых на поверхность вихревого течения в однокомпонентной и многокомпонентной жидкости в вихревом течении и 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 твёрдого тела хорошо согласуется с теоретической зависимостью, полученной на основе предложенной математической модели;

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

**Практическая ценность и реализация результатов работы.** Актуальность исследований в данной области науки обосновывается необходимостью разработки аналитической и физической моделей процессов переноса различных примесей в многофазных вихревых течениях для решения

физических, гидрофизических и экологических проблем. Полученные результаты позволяют описать более детально течение в толще составного вихревого течения. Результаты диссертационной работы важны, прежде всего, для лучшего понимания поведения различных примесей в циркуляционных течениях и более точного прогнозирования их распространения в природных условиях (в стратифицированной гидросфере и атмосфере), а также создадут 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.

Полученные результаты вошли в отчеты по проектам РФФИ №14-01-00015 «Экспериментальное исследование динамики и картины переноса примесей в установившемся вихревом течении», РФФИ №18-01-00116 «Исследование переноса вещества в вихревых и волновых течениях в многокомпонентных средах». Результаты работы входят в программу спецкурсов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова: «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах», «Оптические лабораторные методы гидродинамики», «Методы лабораторного моделирования в геофизике».

**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.

**Личный вклад автора.** Все основные результаты, выносимые на защиту и опубликованные в указанных работах, получены автором диссертации. Постановка задач исследования и научная проблематика разрабатывались диссертантом как единолично, так и при участии д.ф.-м.н. Ю.Д. Чашечкина и д.ф.-м.н. А.В. Кистовича, что обеспечило комплексный подход к изучению темы. Разработка измерительных систем на стадиях работы, апробация и их практическая реализация выполнялась при непосредственном участии автора. Лично автором были выполнены экспериментальные исследования, обработка и анализ данных, а также сравнение с теоретическими результатами.

Работы [1, 2, 24, 33] – написаны единолично автором.

В работах [3 - 32] автор готовила и проводила эксперименты по исследованию закономерностей распространения несмешивающихся примесей в вихревом течении и зависимостей изучаемого течения от физических свойств и объема примеси и параметров изучаемого течения, участвовала в модернизации и настройке экспериментального оборудования, выполняла обработку, интерпретацию и анализ экспериментальных данных, готовила рукописи статей.

В работах [3, 7 - 9] помимо проведения эксперимента, обработки данных и подготовки рукописей статей, автор принимала участие в разработке и валидации математических моделей изучаемых физических процессов на основе полученных экспериментальных данных.

В работах [25, 32] автором был разработан эскизный проект, создан макет и проведены испытания устройства для сбора углеводов.

В патентах [26 - 28] автору принадлежит идея использовать овечью шерсть, как в виде маркера для визуализации течений, так и в качестве сорбента для ликвидации разливов углеводородов на поверхности воды, автор провела патентные исследования и участвовала в написании заявки на получение патентов на полезную модель.

Результаты, приведенные в данной диссертационной работе, неоднократно докладывались автором на международных и российских конференциях. Соискатель являлся руководителем исследовательских проектов по тематике диссертационной работы.

### **Благодарности**

Эта работа не была бы возможной без участия Юлия Дмитриевича Чашечкина, создателя уникального комплекса УНУ ГФК ИПМех РАН. Его эрудиция, широта и глубина знаний, творческий подход и увлеченность проблемами гидродинамики, уникальные экспериментальные способности, потрясающее умение к обобщению и трактовке экспериментов, все, чем Юлий Дмитриевич щедро делился с автором, обеспечило постановку и выполнение этой работы. От всей души выражаю ему самую искреннюю благодарность.

Автор выражает искреннюю благодарность и глубокую признательность д.ф.-м.н. А.В. Кистовичу за внимание к работе, ценные советы, полезные обсуждения и постоянную поддержку.

Хотелось бы поблагодарить заведующего кафедрой физики моря и вод суши Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова профессора д.ф.-м.н. К.В. Показеева и с.н.с. ИПМех РАН Е.В. Степанову за всестороннее содействие и поддержку работы, помощь в проведении экспериментов и обработке данных.

### **Основные 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, дизельное топливо) 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, что подтверждают экспериментальные наблюдения.

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

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

**Апробация работы.** Результаты диссертации были представлены в виде докладов на Международных и российских конференциях: “Физические проблемы экологии” (Москва, 2007), «Потоки и структуры в жидкостях» (Санкт-Петербург, 2007; Москва, 2009; Владивосток, 2011, Санкт-Петербург, 2013), EGU (Вена, 2009, 2010, 2011), «Механика и наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред» (Москва, 2009), «Фундаментальные и прикладные аспекты инновационных проектов Физического факультета МГУ» (Москва, 2009; 2011), Коллоквиуме ЕвроМех531: «Вихри и волны: идентификация и взаимное влияние» (Москва, 2011), Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Вихри и волны в сложных средах» (Москва, 2011; 2012; 2013, Калининград, 2015, Москва, 2016, 2017), Симпозиум IUTAM 12-3 «Волны в жидкостях: эффекты нелинейности, вращения, стратификации и диссипации» (Москва, 2012), XXIII Международный конгресс по теоретической и прикладной механике (ICTAM) (Пекин, 2012), Вторая всероссийская конференция по прикладной океанографии (Москва, 2013), IUTAM Modeling and Control of Transitional and Turbulent Flows (Даболим, 2014), Ломоносовские чтения (2015-2017), 8-ая Всероссийская конференция «Необратимые процессы в природе и технике» (Москва, 2015), Международная научная школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, 2015 – 2019), «Новый форум наука и инновации – современные концепции» (Москва, 2019).

Результаты диссертации были доложены на семинаре «Проблемы механики сплошной среды» под руководством проф. С.В. Нестерова и проф. Д.В. Георгиевского (Москва, 2019).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Количество страниц диссертации – 275, в том числе таблиц – 27, иллюстраций – 116, список литературы содержит 136 наименований.

### **Краткое содержание работы**

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, приведены основные положения, выносимые на защиту, и изложено краткое содержание диссертации по главам.

В **Главе 1** приводятся основы теории вихревых течений в жидкости со свободной поверхностью и требования к экспериментам по изучению процессов переноса вещества в установившемся вихревом течении. Приведено описание экспериментальных установок, используемых для моделирования вихревых течений, описано оборудование, методика лабораторных экспериментов и параметры изучаемых течений.

В ходе выполнения работы эксперименты проводились на трех установках, позволяющих создавать стационарное вихревое течение и контролировать его параметры. Установка «ВТК» (Вихревые течения с кручением) (рис. 1) создана в лаборатории механики жидкостей ИПМех РАН для изучения закрученного потока, и входит в комплекс уникальных установок УНУ ГФК ИПМех РАН, который создал профессор Ю.Д. Чашечкин. Вихревое течение создавалось вращающимся диском, установленным на дне прозрачного цилиндрического контейнера.

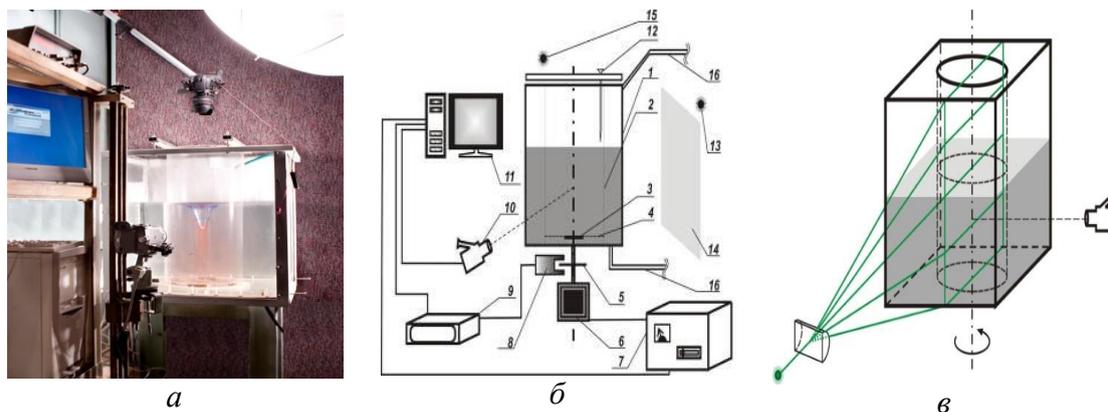


Рисунок 1.– Общий вид стенда для моделирования вихревых течений с кручением (ВТК) УСУ «ГФК ИПМех РАН»: *а)* – фото, *б, в)* – схема.

Для уменьшения оптических искажений контейнер помещался в открытый прямоугольный бассейн из прозрачного полиметилметакрилата. Картина течения регистрируется с помощью фото или видеоаппаратуры.

Серия экспериментов по изучению вихревого течения проводилась на установках для моделирования течений, вихревой поток в которых создается при помощи магнитного якоря, соединенного с мотором магнитным полем (Установка Вихревые течения с магнитным индуктором (ВТМИ)). В качестве индуктора вихревого течения используются магнитные мешалки: Intllab MS-500 и ES-6120 с подогревом. В экспериментах использовались бассейны разной формы и размеров (прямоугольные, квадратные, треугольные, а также цилиндрический). В данных экспериментах свободная поверхность оставалась открытой, что позволяет контролировать введение примеси и регистрировать тонкую структуру течения.

Совместно с коллегами из Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук часть экспериментов была проведена в замкнутых контейнерах круглого и квадратного сечения. В простом по геометрии эксперименте возникало достаточно сложное течение, включающее как вихревую, так и волновые компоненты и в толще, и на свободной поверхности жидкости. Схема течения, возникающего при наличии свободной поверхности, показана на рис. 2.

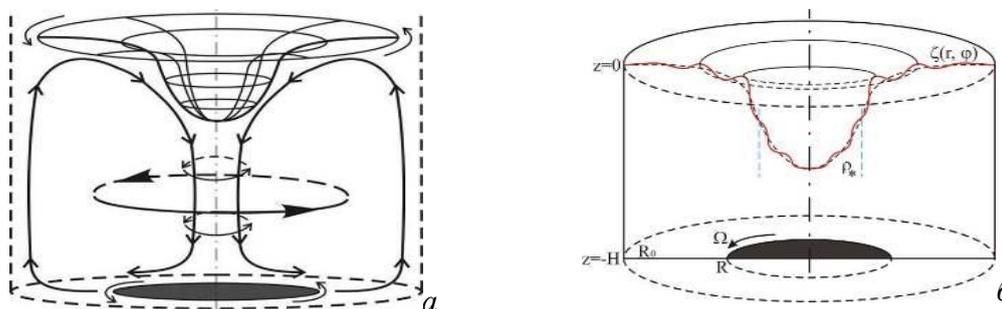


Рисунок 2. – Схема течения, возникающего в цилиндрическом контейнере под действием диска: *а)* – общий вид; *б)* – центральное сечение свободной поверхности составного вихря с волновыми возмущениями

Перемещения маркеров регистрировались для двух типов вихревого течения. Первый – течение однородной жидкости (рис. 3, *а)*, второй – течение базовой жидкости с небольшой порцией несмешивающейся легкой добавки, образующей

в центральной части свободной поверхности «масляное тело» (рис. 3, б). При высоких значениях частоты вращения индуктора на свободной поверхности образуется каверна, при дальнейшем увеличении частоты вращения искажаемая волнами различных типов (рис. 3, в). Для первичного изучения закономерностей движения маркеров по поверхности вихревого течения частоты вращения индуктора выбирались таким образом, чтобы поверхностная каверна была наименее выраженной. Варьирование глубины слоя жидкости, размеров и частоты вращения диска позволяет изучать воспроизводимую картину вихревого течения в широком диапазоне параметров (Таблица 1.).

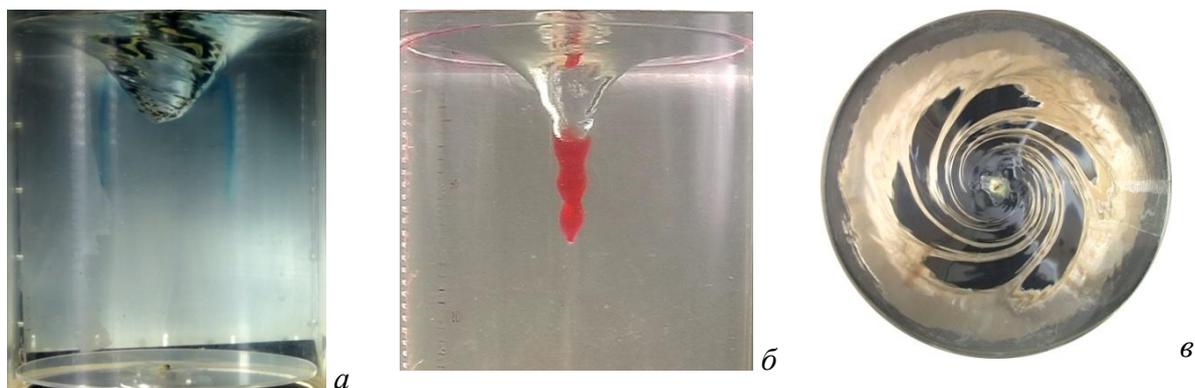


Рисунок 3 – Картина течения в составном вихре: а),  $H = 40$  см,  $R_d = 7,5$  см,  $\Omega_d = 14,2$  с<sup>-1</sup> б) – вид сбоку, в) – вид сверху.

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
Число Рейнольдса $Re = (R^2\Omega) / \nu$	10	$1 \times 10^5$
Число Фруда $Fr = (R^2\Omega^2) / gH$	$1 \times 10^{-2}$	15
Число Вебера $We = \rho L^3\Omega^2 / \sigma$	0.02	300
Число Бонда $Bo = gH^2(\rho_1 - \rho_2) / \sigma$	0.15	2.0
Число Атвуда $A = (\rho_1 - \rho_2) / (\rho_1 + \rho_2)$	$15 \times 10^3$	$40 \times 10^3$
$\xi_H = R_0 / H$	0.08	3.0
$\xi_R = R_0 / R$	0.3	1.0
$\xi_b = 2R_0 / h_0$	0.01	3.0
$L_\Omega = g / \Omega^2$	25	$4 \times 10^3$
$\delta_\Omega = \sqrt{\nu / \Omega}$	$2 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-4}$

Таблица 1. – Основные параметры течения

Многообразие характерных размерных и безразмерных параметров задачи свидетельствует о сложности и нестационарности изучаемого течения, что учитывалось при разработке методики эксперимента и конструкции экспериментальных установок.

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. Установлено, что форма свободной поверхности зависит от всех физических параметров задачи (глубины слоя жидкости, радиуса и формы активатора, частоты вращения).

Всего в экспериментах наблюдались поверхностные каверны трех видов - гладкие, с инерциальными (крупномасштабными) волнами и сложные (с инерциальными и спиральными волнами одновременно). Получена теоретическая зависимость, которая описывает универсальную геометрию вихревых каверн, возникающих в цилиндрических сосудах при вращении соосного диска, и совпадает как с экспериментальными данными, так и с полученной ранее моделью вихревого течения.

Экспериментально и аналитически изучены процессы на свободной поверхности составного вихревого течения. В ходе серии экспериментов были визуализированы волны на свободной поверхности составного вихря, было установлено, что положение волн относительно лабораторной системы координат и друг друга, а также их количество не изменялось с течением временем в определенном диапазоне параметров (рис. 3, *c*). Исходя из полученных данных, можно утверждать, что форма свободной поверхности допускает группу собственных ортогональных преобразований  $SO_6(2)$ .

Визуализация траекторий жидких частиц указывает на то, что в вихревом течении вблизи свободной поверхности присутствует компонента скорости, нормальная к азимутальной компоненте и касательная к поверхности вихря. Для того чтобы учесть данный экспериментальный результат, а также с целью адекватного описания движения жидкости, исследование течения вблизи свободной поверхности проводится в сопутствующей системе координат  $(s, \varphi, n)$ , где  $s$  – длина дуги вдоль поверхности нулевого приближения, отсчитываемая от точки наибольшего заглубления поверхности вихря (координаты которой в цилиндрической системе задаются значениями  $(0, 0, \zeta(0))$ ) до точки  $(r, 0, \zeta(r))$ . Поскольку форма нулевого приближения  $\zeta(r)$  известна [3], то имеет место выражение, определяющее длину дуги

$$s(r) = \int_0^r \sqrt{1 + \zeta_r'^2} dr \quad (1.1)$$

Координата  $\varphi$  совпадает с азимутальной координатой исходной цилиндрической системой координат, а координата  $n$  отсчитывается вдоль нормали к поверхности нулевого приближения. Схематически сопутствующая координатная система (точнее, её единичные орты) представлена на рис. 4, *a*. Однозначная связь между координатами  $r$  и  $s$  позволяет рассматривать форму нулевого приближения как известную функцию переменной  $s$ , то есть  $\zeta = \zeta(s)$ .

Радиус-вектор точки, лежащей на поверхности нулевого приближения, определяется выражением

$$\mathbf{r}_\zeta = R(s) \mathbf{e}_r + \zeta(s) \mathbf{e}_z \quad (1.2)$$

где  $R(s)$  – известная функция радиуса точки на поверхности.

Давление в точке с координатами  $(s, n)$  (угловая зависимость в этой задаче отсутствует) определяется выражением

$$p(s, n) = g(\zeta(s_*) - \zeta(s) - nR'(s)) + p_0 + \tilde{p}(s, n) \quad (1.3)$$

в котором все составляющие давления нормированы на плотность воды.

Первый член в (1.3) – гидростатическое давление столба воды, находящегося над точкой  $P(s, n)$ , как показано на рис. 4, б. Второй и третий члены – атмосферное давление и давление, обусловленное течением воды соответственно.

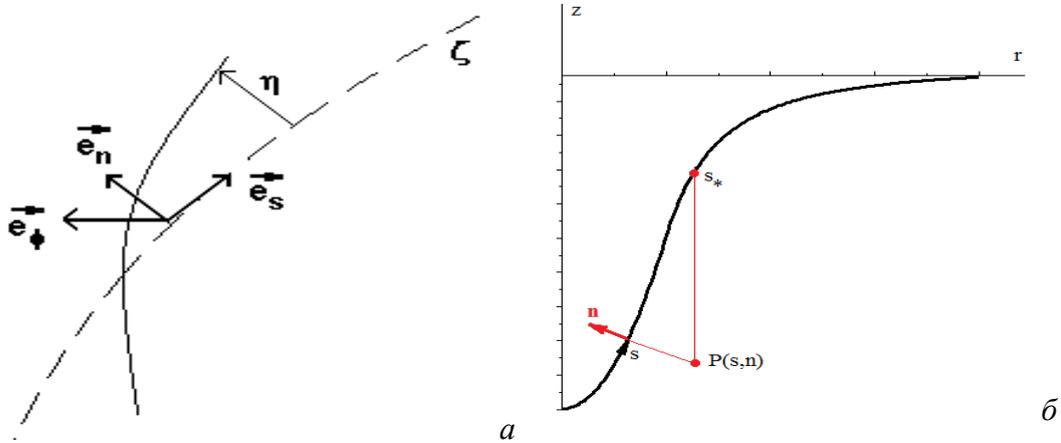


Рисунок 4 – Сопутствующая поверхности координатная система

Для областей центрального (твердотельного) и периферийного течений, которые характеризуются азимутальной скоростью вида

$$\begin{aligned}
 1. \quad v_\varphi &= \omega r = \omega(R(s) - n\zeta'(s)) = \omega R(s_*), \quad 0 \leq r \leq a \\
 2. \quad v_\varphi &= \frac{\omega a^2}{r} = \frac{\omega a^2}{R(s) - n\zeta'(s)} = \frac{\omega a^2}{R(s_*)}, \quad r \geq a
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

можно записать:

$$\begin{aligned}
 \frac{\omega^2 R^2(s)}{2} - g\zeta(s) + g\zeta_0 &= \sigma \left( \frac{\zeta'(s)}{R(s)} + \frac{\zeta''(s)}{R'(s)} \right), \\
 -\frac{\omega^2 a^4}{2R^2(s)} - g\zeta(s) + g\zeta_0 &= \sigma \left( \frac{\zeta'(s)}{R(s)} + \frac{\zeta''(s)}{R'(s)} \right)
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

Интегрирование (1.5) определяет форму поверхности нулевого приближения в пренебрежении эффектами поверхностного натяжения

$$\zeta(s_*) = \zeta_0 + \frac{\omega^2}{2g} \left[ R^2(s_*)\theta(a - R(s_*)) + a^2(2 - a^2/R^2(s_*))\theta(R(s_*) - a) \right]
 \tag{1.6}$$

Полученный результат позволяет провести исследование структуры поля скорости вблизи свободной поверхности вихря в системе координат  $(s, n, \varphi)$ .

В области твердотельного вращения

$$R = R_1 e^{-\varepsilon(\varphi - \varphi_1)}, \quad z = z_1 - \frac{\omega^2 R_1^2}{2g} \left( 1 - e^{-2\varepsilon(\varphi - \varphi_1)} \right)
 \tag{1.7}$$

а в области периферии

$$R = R_2 e^{-\varepsilon(\varphi - \varphi_2)}, \quad z = z_2 - \frac{\omega^2 a^4}{2gR_2^2} e^{2\varepsilon(\varphi - \varphi_2)}
 \tag{1.8}$$

Здесь  $\varepsilon = \tilde{\omega}/\omega$  (согласно экспериментальным данным  $\varepsilon \ll 1$ ), а  $R_i, z_i, \varphi_i$  – постоянные интегрирования. Расчёты, проведённые по формулам (1.7, 1.8), показывают, что жидкие частицы вблизи поверхности движутся по спиральям от периферии к центру течения (рис. 5).

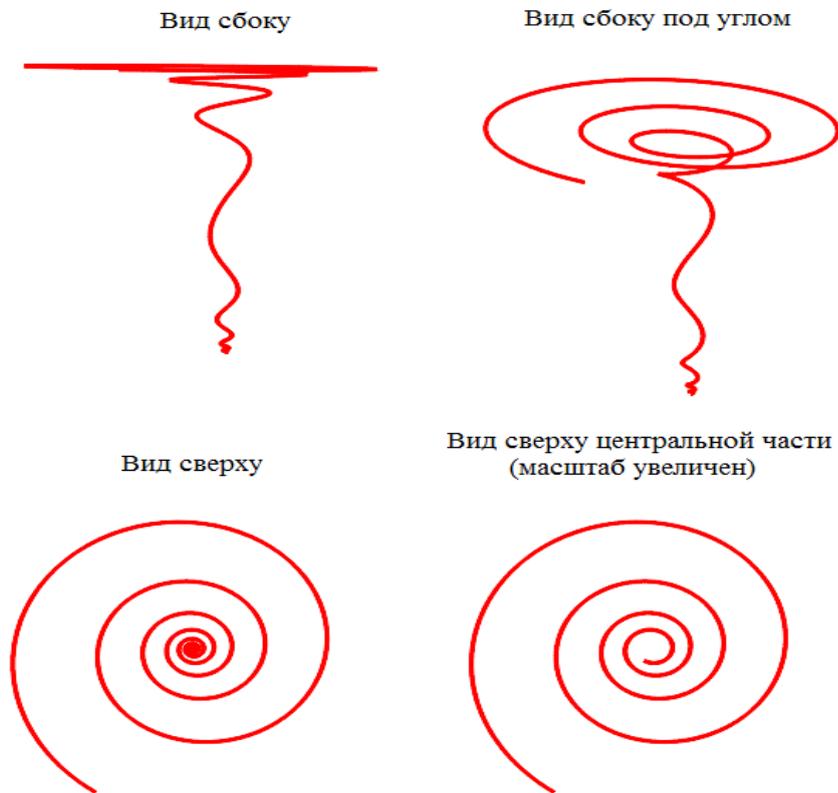


Рисунок 5 – Траектории жидких частиц вблизи поверхности вихря

Проведенные эксперименты со смешивающейся с водой примесью (чернила, краска, уранил) показали, что вдоль свободной поверхности жидкие частицы движутся по спиральным траекториям (рис. 6), в то же время перенос жидких частиц в толщу жидкости происходит по винтовым нисходящим траекториям, радиус которых слабо изменяется вдоль вертикали.

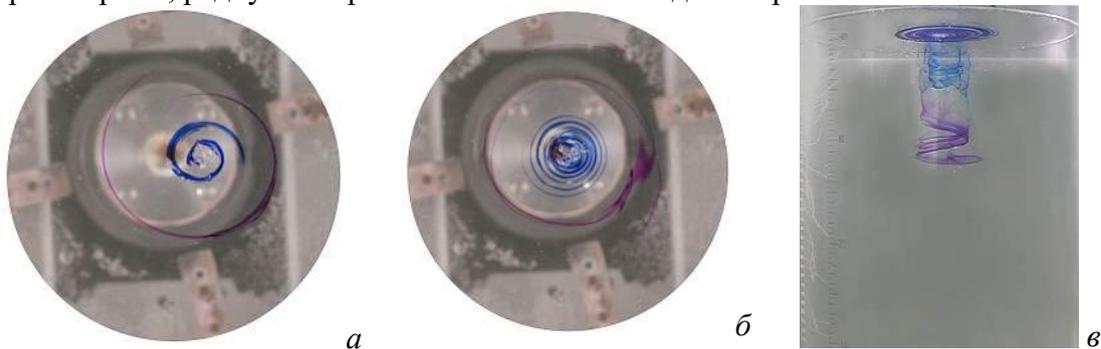


Рисунок 6 – Перенос растворимого маркера на поверхности и в толще жидкости ( $H = 40$  см,  $R = 5.0$  см) а - б) –  $t = 7, 23$  с ( $\Omega = 180$  об/мин), в)  $\Omega = 200$  об/мин

Как видно из рис. 6, расстояние между рукавами спиралей растёт с увеличением радиального расстояния. Это означает, что наблюдаемые спирали

относятся к логарифмическим типу (у спирали Архимеда расстояние между рукавами неизменно) в полном соответствии с теоретическими результатами.

Хорошее совпадение форм свободной поверхности, описываемой аналитическими соотношениями, с экспериментально наблюдаемыми при различных параметрах вихревого течения, указывает на применимость развитого в представленной работе упрощённого теоретического описания течения данного вида.

В Главе 1 также была решена задача о течении вблизи диска, служащего индуктором составного вихревого течения, в предположении, что вращающийся индуктор контактирует только с жидкостью и при условии, что физические поля считаются стационарными и независимыми от азимутального угла  $\varphi$ . Показано, что относительно поверхности диска жидкие элементы также движутся по логарифмическим спиральям.

В Главе 2 представлены результаты экспериментальных исследований переноса растворимой примеси из компактного пятна на свободной поверхности жидкости и внутрь покоящейся или вовлеченной в составное вихревое движение жидкости, а также проведена визуализация и качественный анализ течения вблизи кромки диска. Растворимые красители образуют спиральные рукава, составляющие картину переноса вещества на вращающейся поверхности жидкости. Направления основного течения и роста спиральных рукавов противоположны. Рост спиральных рукавов происходит во всем диапазоне исследованных параметров течения.

Проведенные эксперименты по определению основных характеристик процесса распространения растворимой примеси в толщу жидкости в составном вихревом течении подтвердили линейный характер зависимости глубины проникновения примеси вблизи вертикальной оси течения от времени. По результатам проведенных экспериментов было прослежено изменение формы и размеров окрашенной области. Рассчитана скорость изменения опускания красителя в толщу жидкости в зависимости от частоты вращения индуктора.

Сравнение полученных результатов (рис. 7, а) с результатами аналогичного эксперимента, в котором использовалась смешивающаяся примесь (рис. 7, б), показало геометрическое подобие и схожую динамику изменения размеров образующихся в начальный момент структур.

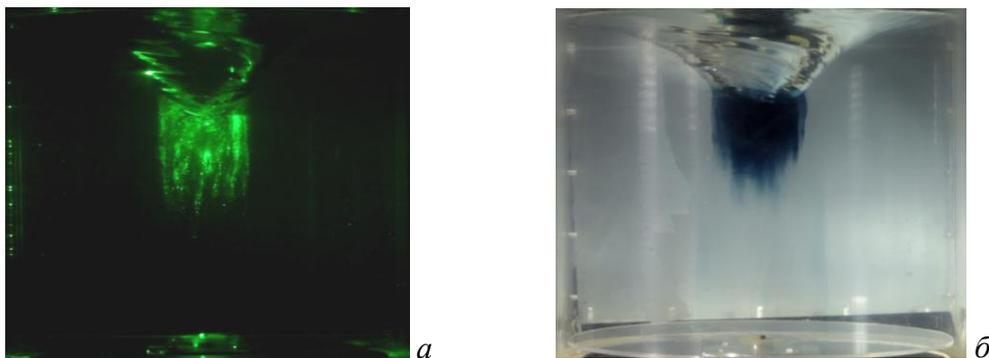


Рисунок 7 – Сравнение результатов экспериментов по внесению в течение маркеров (а) и смешивающейся примеси (б) через свободную поверхность при  $H = 30$  см,  $R = 14$  см,  $\Omega = 220$  об/мин. Время, прошедшее от введения примеси: а) –  $t = 13$  с, б) –  $t = 15$  с.

Зафиксированная в эксперименте структура центральной части составного вихря позволила предположить наличие в течении твердотельно вращающегося ядра, внешняя часть которого имела форму цилиндра (это неоднократно подтверждалось экспериментами со смешивающейся примесью, в которых хорошо визуализировалась форма вихревого ядра), а внутренняя часть состояла из т.н. вторичных вихрей, которые имели нестационарный характер движения. Рассчитана скорость изменения опускания красителя в толщу жидкости в зависимости от частоты вращения индуктора.

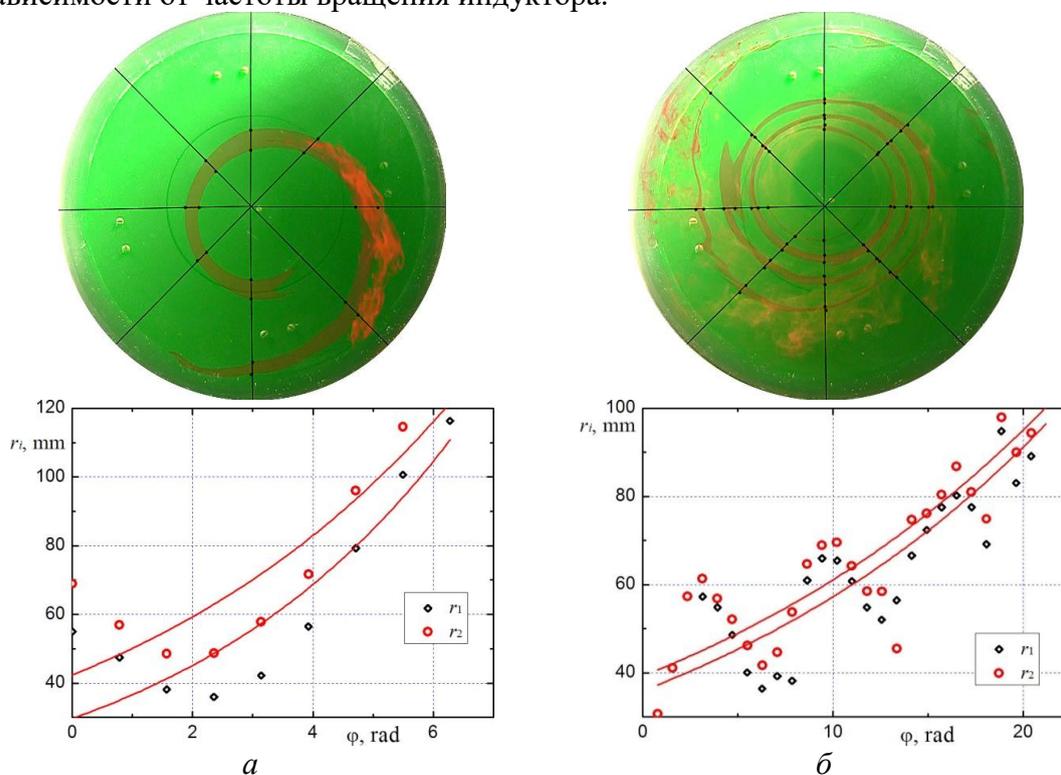


Рисунок 8. – Поверхностные спиральные структуры ( $H = 20$  см,  $R = 7,5$  см,  $\Omega = 240$  об/мин): *а*), *б*) - через 9, 15 с после падения капли красителя на свободную поверхность соответственно

Проведенные эксперименты показали, что вдоль свободной поверхности 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 (рис. 8).

Все измеренные спиральные структуры наиболее точно интерполируются с 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.

В **Главе 3** рассмотрена задача аналитического определения формы масляного тела в составном вихре на основе анализа уравнений механики разноплотных жидкостей с физически обоснованными граничными условиями. В случае вращения жидкой среды, состоящей из двух несмешивающихся компонент образующийся при этом вихрь оказывается как бы составленным из нескольких областей, характеристики течения в каждой из которых существенно разнятся друг от друга. Свободную поверхность такого сложного вихря можно

условно представить в виде суммы цилиндрически симметричной поверхности вращения и нормальным отклонением от этой поверхности, наложенных на неё.

В экспериментах с несмешивающейся примесью в качестве добавки использовались жидкие ненасыщенные жирные кислоты (касторовое, подсолнечное и авиационное масла), а также дизельное топливо, нефть, мазут и др. Центральная часть объема несмешивающейся примеси в дальнейшем называется «масляным телом». Исходное, конечное состояния, и система координат приведены на рис. 9.

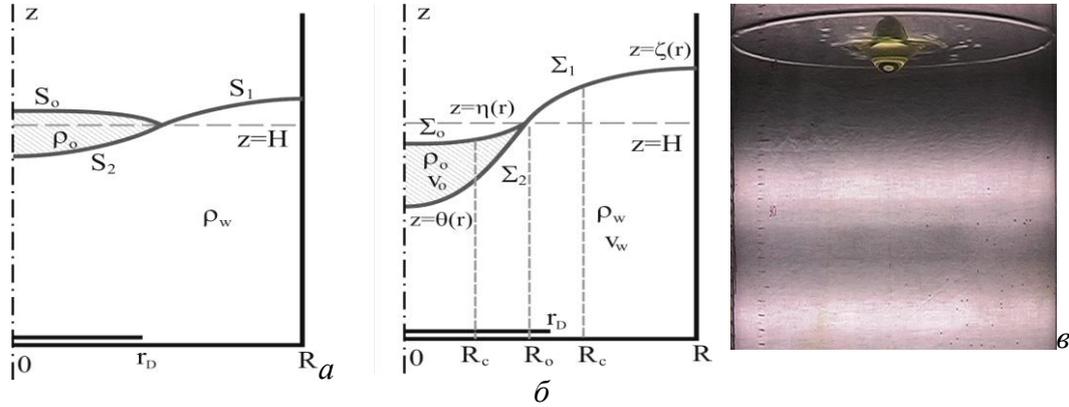


Рисунок 9 – Исходное (а) и конечное (б) состояния системы двухкомпонентной жидкости «масло-вода», (в) – фото профиля

В начальном состоянии объёмы воды  $V_w = \pi R^2 H$  и масла  $V_o$  задаются и считаются неизменными во всех состояниях системы. Плотности воды  $\rho_w$  и масла  $\rho_o$  постоянны во всё время процесса. В неподвижном начальном состоянии  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_0$  – поверхности раздела «вода – воздух», «вода – масло» и «масло – воздух» соответственно. При описании составного вихря делаются следующие предположения. Символами  $\Sigma_{wa}$ ,  $\Sigma_{wo}$  и  $\Sigma_{oa}$  обозначаются поверхности раздела «вода – воздух», «вода – масло» и «масло – воздух» соответственно.

Задача рассматривается в цилиндрической системе координат, вертикальная ось  $z$  которой направлена против вектора гравитационного ускорения  $\mathbf{g}$ , а начало совпадает с центром вращающегося диска. Система гидродинамических уравнений, описывающих движение, имеет вид

$$\mathbf{v}'_t + (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\Delta\mathbf{v} + \mathbf{g}, \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3.1)$$

Под величинами  $\mathbf{v}$ ,  $\rho$ ,  $\nu$  понимаются скорость  $\mathbf{v}_w$ , плотность  $\rho_w$  и кинематическая вязкость воды  $\nu_w$  в области, занимаемой водой, или скорость  $\mathbf{v}_o$ , плотность  $\rho_o$  и кинематическая вязкость масла  $\nu_o$  в области, занимаемой маслом.

На твёрдых поверхностях выполняются условия прилипания

$$\mathbf{v}_w|_{r=R} = \mathbf{v}_w|_{z=0, r \in [r_D, R]} = 0, \quad \mathbf{v}_w|_{z=0, r \in [0, r_D]} = r\omega\mathbf{e}_\varphi \quad (3.2)$$

Здесь  $r_D$ ,  $R$  – радиусы вращающегося диска и обечайки соответственно,  $\omega$  – угловая частота вращения диска,  $\mathbf{e}_\varphi$  – азимутальный орт цилиндрической системы координат.

На поверхностях раздела  $\Sigma_{ij}$  выполняются динамические

$$(p_1 - p_2)n_i = (\sigma'_{ik}{}^{(1)} - \sigma'_{ik}{}^{(2)})n_k + \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) n_i \quad (3.3)$$

и кинематические

$$\left. \frac{d\Sigma_{ij}}{dt} \right|_{\Sigma_{ij}=0} = 0 \quad (3.4)$$

граничные условия.

Здесь  $\mathbf{n}$  – единичная нормаль,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $R_1$ ,  $R_2$  – главные радиусы кривизны. Все эти величины относятся к соответствующей поверхности раздела. Символы  $p_1$ ,  $p_2$  обозначают давления по разные стороны от выбранной поверхности, а  $\sigma'_{ik}{}^{(1,2)}$  – тензоры вязких напряжений соприкасающихся сред.

Система соотношений (3.1 – 3.4) чрезвычайно сложна для анализа и её точное решение на данный момент не достигнуто. В то же время имеется возможность построить «нулевое» приближение для форм поверхностей раздела контактирующих сред, в котором все физические поля вблизи этих поверхностей не зависят ни от времени, ни от азимутальной координаты  $\varphi$ . В рамках этого приближения считается, что  $\mathbf{v}_w = v_w \mathbf{e}_\varphi$ ,  $\mathbf{v}_o = v_o \mathbf{e}_\varphi$ ; эффекты поверхностного натяжения считаются малыми и не принимаются во внимание. Поверхности раздела задаются соотношениями

$$\begin{aligned} \Sigma_{wa} : z - \zeta(r) = 0, \quad r \in [R_o, R]; \quad \Sigma_{wo} : z - \theta(r) = 0, \quad r \in [0, R_o]; \\ \Sigma_{oa} : z - \eta(r) = 0, \quad r \in [0, R_o] \end{aligned} \quad (3.5)$$

Здесь  $R_o$  – радиальная координата точки тройного контакта вода-масло-воздух, как показано на рис. 9.

В результате система (3.1) приобретает вид

$$p'_r = \rho \frac{v^2}{r}, \quad p'_z = -\rho g, \quad v''_{rr} + \frac{v'_r}{r} - \frac{v}{r^2} + v''_{zz} = 0 \quad (3.6)$$

причём условие несжимаемости  $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$  тождественно удовлетворяется.

Представление давления в различных областях пространства в формах

$$p_w^{(1)} = p_a + \rho_w g (\zeta - z) + q_w^{(1)}(r, z), \quad r \in [R_o, R] \quad (3.7)$$

$$p_o = p_a + \rho_o g (\eta - z) + q_o(r, z), \quad r \in [0, R_o] \quad (3.8)$$

$$p_w^{(2)} = p_a + \rho_o g (\eta - \theta) + \rho_w g (\theta - z) + q_w^{(2)}(r, z), \quad r \in [0, R_o] \quad (3.9)$$

где  $p_a$  – атмосферное давление, и подстановка (3.7 – 3.9) в (3.6) и граничные условия (3.3, 3.4) позволяет сформировать два возможных решения для поля скорости.

Были получены соотношения, характеризующие форму «нулевого» приближения поверхности составного вихря:

В случае  $R_c < R_o$ :

$$\eta(r) = H - \frac{(\alpha^2 - 1)A_o^2 R_c^4}{2g R_o^2} + \frac{A_o^2 R_c^2}{2g} \left[ \left( \frac{r^2}{R_c^2} - 2 \right) \mathcal{G}(R_c - r) - \frac{R_c^2}{r^2} \mathcal{G}(r - R_c) \right],$$

$$r \in [0, R_o]$$

$$\theta(r) = H + \frac{(\alpha^2 - 1)A_o^2 R_c^4}{2g R_o^2} \frac{\rho_o}{\rho_w - \rho_o} + \frac{\alpha^2 \rho_w - \rho_o}{\rho_w - \rho_o} \frac{A_o^2 R_c^2}{2g} \left[ \left( \frac{r^2}{R_c^2} - 2 \right) \mathcal{G}(R_c - r) - \frac{R_c^2}{r^2} \mathcal{G}(r - R_c) \right], \quad (3.10)$$

$$r \in [0, R_o]$$

$$\zeta(r) = H - \frac{\alpha^2 A_o^2 R_c^4}{2g r^2}, \quad r \in [R_o, R]$$

где  $H$  – толщина слоя воды до включения вращающегося диска,  $\alpha = \frac{\rho_o v_o}{\rho_w v_w}$

В случае  $R_c > R_o$ :

$$\eta(r) = H - \frac{A_o^2}{2g} \left[ 2\alpha^2 R_c^2 + (1 - \alpha^2) R_o^2 \right] + \frac{A_o^2 r^2}{2g}, \quad r \in [0, R_o]$$

$$\theta(r) = H - \frac{A_o^2}{2g} \left[ 2\alpha^2 R_c^2 + \frac{(\alpha^2 - 1)\rho_o}{\rho_w - \rho_o} R_o^2 \right] + \frac{\alpha^2 \rho_w - \rho_o}{\rho_w - \rho_o} \frac{A_o^2 r^2}{2g}, \quad r \in [0, R_o] \quad (3.11)$$

$$\zeta(r) = H + \frac{\alpha^2 A_o^2 R_c^2}{2g} \left[ \left( \frac{r^2}{R_c^2} - 2 \right) \mathcal{G}(R_c - r) - \frac{R_c^2}{r^2} \mathcal{G}(r - R_c) \right], \quad r \in [R_o, R]$$

Выражения (3.10, 3.11) переходят друг в друга при  $R_c = R_o$ , то есть когда граница области, занимаемой маслом, совпадает с границей твердотельного вращения составного вихря.

В Главе 3 также представлены результаты экспериментальных исследований переноса несмешивающейся примеси из компактного пятна на свободной поверхности жидкости внутрь покоящейся или вовлеченной в составное вихревое движение жидкости, включая режим формирования эмульсий. Сравнение размеров образующегося в вихревом течении масляного тела в зависимости от количества и физических свойств добавленной в поток несмешивающейся примеси показывает, что увеличение вязкости маркирующей добавки ведет к уменьшению вертикального размера масляного тела. Также на вертикальный размер области, занятой несмешивающейся жидкостью в потоке, влияет коэффициент поверхностного натяжения. С его ростом увеличивается глубина втягивания примеси в течение (рис. 10).

Сохранение формы масляного тела при изменении угловой скорости вращения диска позволяет характеризовать относительное изменение его размеров одним отношением  $\xi_b = 2R_k / h_k$  в зависимости от числа Рейнольдса. В диапазоне параметров  $Re$  от 1 000 до 5 500 эта зависимость представляется

двумя линейными эмпирическими закономерностями  $\zeta_b = aRe + b$ : при малых числах Рейнольдса – кривая быстро спадающая  $a = -1.9 \cdot 10^{-3} \pm 4.0 \cdot 10^{-4}$ ,  $b = 5.2 \pm 0.7$ , при больших числах  $Re$  – пологая  $a = -1.7 \cdot 10^{-4} \pm 2.9 \cdot 10^{-5}$ ,  $b = 1.2 \pm 0.1$  (рис. 11).

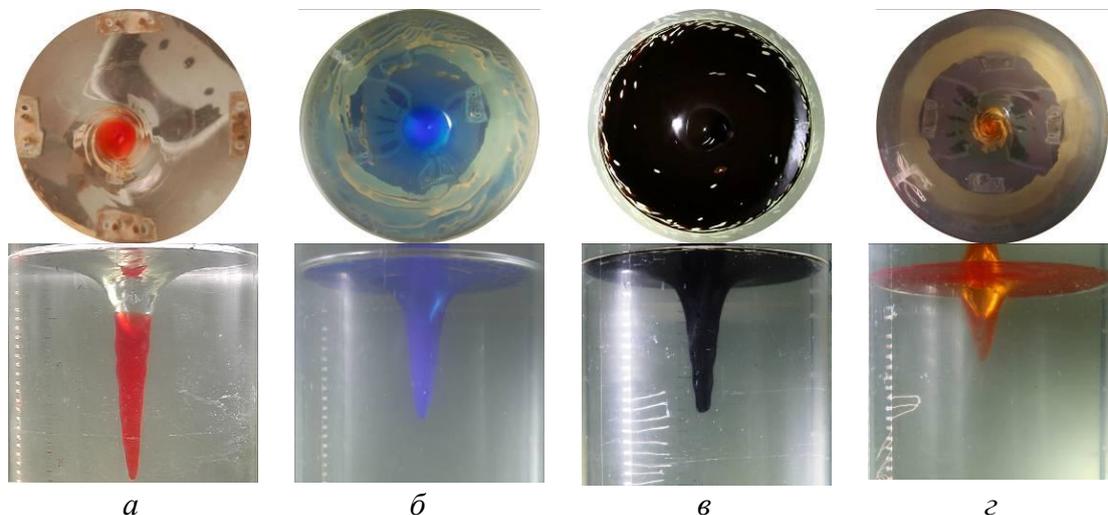


Рисунок 10 – Распределение несмешивающейся примеси на поверхности и в толще составного вихря  $H_w = 40$  см,  $R_d = 7.5$  см,  $V_m = 150$  мл,  $\Omega_d = 770$  об/мин:  
 а) подсолнечное масло, б) смесь подсолнечного масла и дизельного топлива в равных пропорциях,  
 в) нефть, г) дизельное топливо

Увеличение скорости вращения диска приводит к росту вертикальной компоненты скорости течения в центре контейнера и соответственно увеличению силы трения, вытягивающей масляное тело.

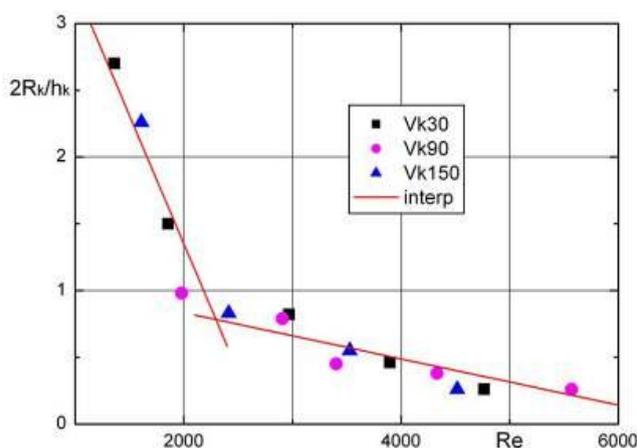


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента остроты  $\xi_b$  масляного тела от параметров течения

Согласованность аналитических зависимостей для форм поверхностей границ раздела фаз определяется возможностью удовлетворительной аппроксимации экспериментально зафиксированных поверхностей при помощи аналитических выражений. Аппроксимирующие коэффициенты подбираются

методом наименьших квадратов путем минимизации функционала. На рис. 12, б представлены зафиксированные в эксперименте границы раздела фаз, дополненные наложенными аппроксимирующими кривыми в соответствии с полученными аналитическими формулами и значениями параметров.

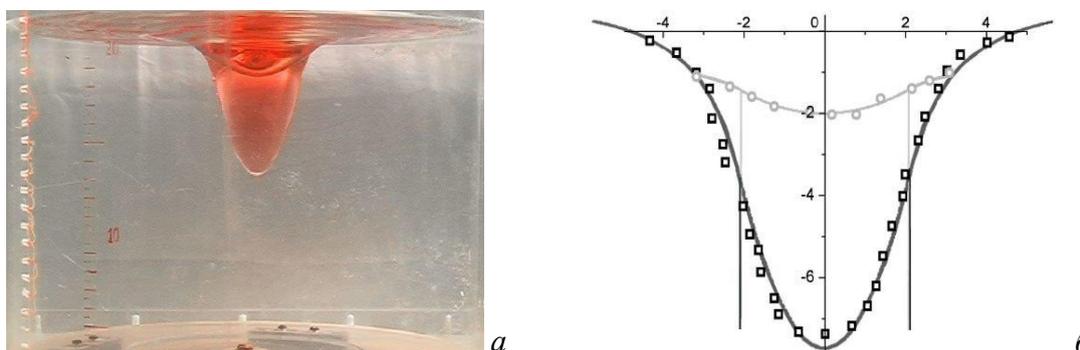


Рисунок 12. Форма масляного тела в вихревом течении ( $H = 20$  см,  $\Omega = 320$  об/мин,  $V_0 = 150$  мл): а) – фото сбоку, б) – экспериментальные данные и аппроксимирующие кривые.

Полученная аналитически форма нулевого приближения для составного 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.

При распаде масляного тела потеря сплошности поверхности раздела зависит от типа примеси. Вид образующейся эмульсии зависит от частоты вращения: при средних угловых скоростях вращения формируется прямая эмульсия, с увеличением скорости наблюдаются оба вида, а при больших скоростях – инвертная эмульсия. Все наблюдаемые картины течения устойчиво воспроизводятся при повторении экспериментов и сохранении условий в пределах точности опытов.

**Глава 4** 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 твердотельных маркеров разных форм и размеров в вихревом течении в многофазных жидкостях.

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. Перемещение твердотельного объекта, особенно в вихревом течении, осложняется наличием сдвига скоростей на его границах, благодаря чему твердотельный объект помимо своего основного движения вокруг центра вихря начинает вращаться вокруг своей собственной оси. Поскольку плавучий объект

обладает присущими ему физико-химическими характеристиками, отличающимися от характеристик жидкой среды, при описании его 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.

Движение маркера, который перемещается по поверхности жидкости, вовлеченной в составное вихревое течение, сводится к комбинации его обращения вокруг вертикальной оси течения и одновременно вращения вокруг собственного центра масс [24]. Для удобства описания перемещений маркера по свободной поверхности течения вводятся несколько систем координат. Начало одной из них  $XOY$  (прямоугольной декартовой) совпадает с геометрическим центром свободной поверхности, оси направлены вдоль сторон кадра видеозаписи картины течения, плоскость расположения осей координат системы совпадает с уровнем невозмущенной свободной поверхности до включения вращения индуктора (рис. 13). Другая система координат – полярная  $(r, \psi)$  – располагается в той же плоскости и наиболее удобна для регистрации перемещений маркера вокруг вертикальной оси течения. В этой системе ведется отсчет координат центра маркера в зависимости от времени.

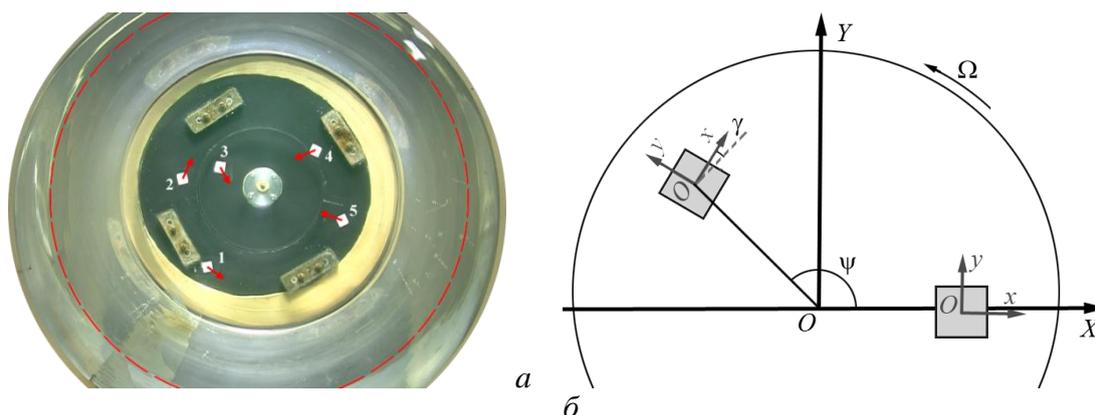


Рисунок 13 – Перемещение маркера по свободной поверхности:  
 а) квадратный маркер (1×1 см),  $\Omega = 300$  об/мин; 1 – 5 с, 2 – 20 с, 3 – 27 с, 4 – 35 с, 5 – 44 с - наложенные последовательные кадры, б) введенные системы координат

С центром маркера связана присоединенная (подвижная) декартова система координат  $xOy$ , используемая для задания угла «верчения»  $\gamma$ , дополнительным углом  $\theta$  описывается отклонение между мгновенным положением оси  $x$  системы координат  $xOy$  и радиус-вектором маркера  $r$ .

При помещении маркера на поверхность вихревого течения на его нижнюю поверхность начинают действовать вязкие касательные напряжения со стороны жидкости, которые переносят его как целое вдоль некоторой траектории, лежащей на поверхности, и вращают вокруг его собственного центра масс. По мере продвижения к центру вихревой воронки маркер попадает в переходную область, пересекает границу между твердотельным и периферийным типами вращения вихря и постепенно меняет собственное вращение относительно центра масс на противоположное, которое сохраняется после полного перехода

маркера в область твердотельного вращения.

Характер «верчения» маркера зависит от его формы и угловой скорости вращения диска-активатора  $\Omega$ . Круглый маркер после короткого интервала вовлечения ( $\Delta t = 5$  с) вертится с практически постоянной угловой скоростью, величина которой монотонно растет с увеличением скорости вращения диска:  $\omega_1 = d\varphi_1 / dt = 66.6 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = d\varphi_2 / dt = 99.3 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_3 = d\varphi_3 / dt = 134.8 \text{ с}^{-1}$ .

Квадратный маркер также вертится с практически постоянной угловой скоростью при малой угловой скорости вращения диска  $\omega_4 = d\varphi_4 / dt = 30.1 \text{ с}^{-1}$  (при  $\Omega = 3.3 \text{ с}^{-1}$ ) и при большой  $\omega_5 = d\varphi_5 / dt = 128.2 \text{ с}^{-1}$  ( $\Omega = 16.7 \text{ с}^{-1}$ ). При промежуточных значениях угловой скорости вращения диска-активатора  $\Omega = 9.2 \text{ с}^{-1}$  квадратный маркер вертится неравномерно (кривая 2, рис. 14, б), что отражает сложный характер взаимодействия увлекаемого квадратного маркера с основным течением.

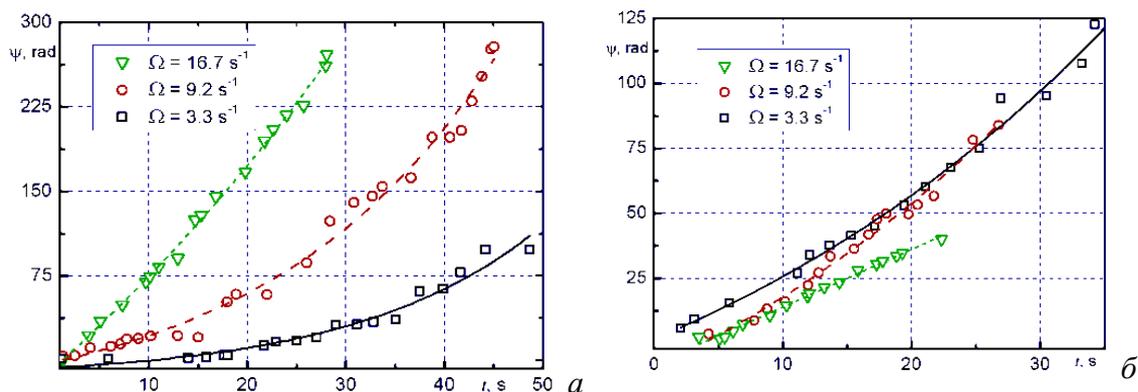


Рисунок 14 – Угол поворота маркера вокруг собственной оси от времени ( $H = 40$  см,  $R = 7.5$  см,  $\Omega = 3,3, 9,2, 16,7 \text{ с}^{-1}$ ): а) круговой цилиндр радиусом 0.5 см и высотой 0.3 см, б) параллелепипед  $1.0 \times 1.0 \times 0.3$  см

В Главе 4 была предложена теоретическая модель, описывающая движение маркеров, помещенных на поверхность вихревого течения в однокомпонентной жидкости. 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.

При оценке силового воздействия водяного потока на маркер используется экспериментальный факт, что его глубина погружения в воду существенно меньше характерных масштабов приповерхностного течения. Это позволяет использовать приближение отсутствия возмущений потока за счёт помещения на его поверхность маркера. На основании этого предполагается, что маркер как бы расплывается по поверхности вихря, но при расчётах сохраняет свою плоскую форму.

Маркер, находящийся на поверхности воды, испытывает на себе действие силы тяжести, архимедовой силы и силы гидродинамического происхождения, которая представляет собой результат сложения нескольких сил, порождённых различными физическими явлениями.

Гидродинамическая сила определяется распределением давления по нижней и верхней поверхностям маркера, капиллярными эффектами, возникающими на контактной границе воды на ребре маркера, эффектами увлечения маркера потоком и его торможения за счёт его погружения в воду, а также эффектами вязкого взаимодействия с водой на всей контактирующей поверхности.

Получение точных аналитических выражений для всех упомянутых сил в случае маркера произвольной формы представляет собой, по-видимому, неразрешимую задачу и потому в работе использовался ряд приближений, позволяющих получить конструктивные результаты.

Первое приближение состоит в том, что движение маркера всегда описывается перемещением его центра масс и вращением вокруг мгновенной оси, всегда проходящей через него нормально к поверхности жидкости. Так как в экспериментах использовались маркеры, форма которых проявляет центральную симметрию (непрерывную или дискретную), то касательная к поверхности жидкости компонента суммарной капиллярной силы, действующей на маркер, равна нулю (рис. 15).

Сила, действующая со стороны потока воды на погружённую часть ребра маркера, определяется выражением

$$\mathbf{F}_f = \oint_L c_f(L) \mathbf{v} (\mathbf{v} \cdot (\mathbf{v} - \dot{\mathbf{r}}_c)) dL,$$

где  $\mathbf{r}_c$  – радиус-вектор центра масс маркера;  $\mathbf{V}$  – поле скорости воды, которое по причине малой толщины маркера по сравнению с характерными масштабами течения считается меняющимся только вдоль контура  $L$ , ограничивающего ребро маркера;  $\mathbf{v}$  – внутренняя нормаль к контуру;  $c_f(L)$  – локальный погонный коэффициент сопротивления формы (в случае произвольной формы ограничивающего контура  $L$  этот коэффициент – величина трудноопределимая); точки над символами здесь и далее обозначают дифференцирование по времени. По причине центральной симметричности маркеров, скоростной напор, возникающий на части контура и разгоняющий маркер, практически полностью компенсируется тормозящим эффектом, возникающим на оставшейся части контура. В результате второе приближение состоит в пренебрежении силой  $\mathbf{F}_f$ , порождённой воздействием потока на ребро маркера, что позволяет считать маркер бесконечно тонким, а его центр масс расположенным на поверхности жидкости.

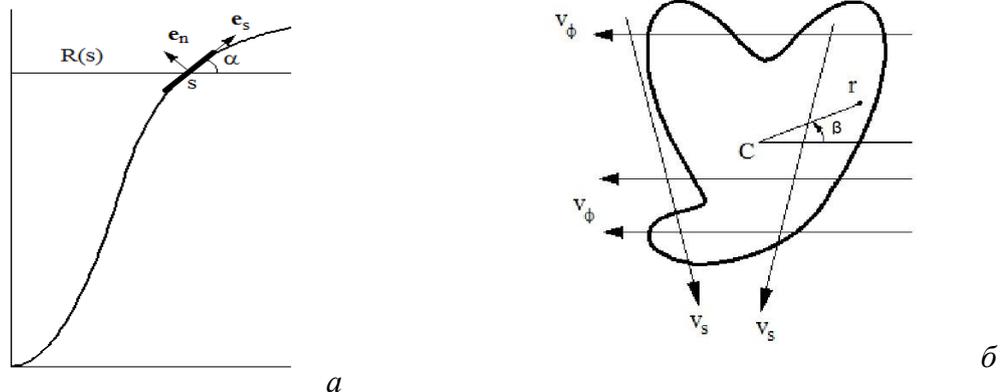


Рисунок 15 – Схематическое изображение маркера, находящегося на поверхности вихря (а) и поля скорости, примыкающего к его нижней стороне (б)

Если бы маркер располагался на горизонтальной поверхности, результирующая силы тяжести, архимедовой силы, нормальной к поверхности маркера компоненты капиллярной силы и силы, порождённой разностью давлений на верхней и нижней поверхностях была бы равна нулю. В случае же наклонной поверхности жидкости эта результирующая сила направлена по касательной к поверхности жидкости, поскольку сам маркер от этой поверхности не отрывается, и задаётся выражением

$$\mathbf{F}_R = \lambda m g \mathbf{e}_t,$$

где  $m$  – масса маркера;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\lambda$  – некоторый безразмерный коэффициент, пропорциональный тангенсу угла наклона поверхности жидкости к горизонту;  $\mathbf{e}_t$  – единичный касательный вектор к поверхности жидкости.

На нижнюю поверхность маркера действуют вязкие касательные напряжения со стороны жидкости, которые переносят его как целое вдоль некоторой траектории, лежащей на поверхности, и вращают вокруг его собственного центра масс. В рамках сделанных приближений поверхностная плотность этой вязкой силы определяется величиной

$$\mathbf{f}_v = \kappa (\mathbf{v}_t - \dot{\mathbf{r}}_c - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})$$

где  $\mathbf{v}_t$  – касательная к поверхности маркера компонента поля скорости воды в точке с координатой  $\mathbf{r}_c + \mathbf{r}$ ;  $\mathbf{r}$  – локальный радиус-вектор точки на поверхности маркера с началом в центре масс, как показано на рис. 15;  $\kappa$  – некоторый коэффициент, характеризующий сцепление поверхности маркера (в зависимости от его материала, шероховатости и т.д.) с жидкостью; член  $\mathbf{v}_t - \dot{\mathbf{r}}_c - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$  представляет собой скорость движения точки на дне маркера относительно потока жидкости.

Действующие на маркер полная вязкая сила и полный момент вязких сил относительно оси его вращения, проходящей через центр масс, определяются выражениями

$$\mathbf{F}_v = \int_S \mathbf{f}_v dS, \quad \mathbf{M}_v = \int_S \mathbf{r} \times \mathbf{f}_v dS$$

где  $S$  – площадь нижней поверхности маркера.

Момент силы  $\mathbf{F}_R$ , приложенной к центру масс, равен нулю.

Таким образом, в принятой приближённой модели уравнения и начальные условия, описывающие движения маркера по поверхности жидкости, имеют вид

$$\begin{aligned} m \ddot{\mathbf{r}}_c &= \mathbf{F}_v + \mathbf{F}_R = \kappa \int_S (\mathbf{v}_w - \dot{\mathbf{r}}_c - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) dS + \lambda m g \mathbf{e}_t \\ J \dot{\boldsymbol{\omega}} &= \kappa \int_S \mathbf{r} \times (\mathbf{v}_w - \dot{\mathbf{r}}_c - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) dS, \quad \dot{\mathbf{r}}_c|_{t=0} = 0, \quad \mathbf{r}_c|_{t=0} = \mathbf{r}_{c0}, \quad \boldsymbol{\omega}|_{t=0} = 0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Здесь  $J$  – момент инерции маркера относительно указанной оси вращения.

Форма поверхности, по которой движется маркер, задаётся соотношением

$$\zeta(s) = \zeta_0 + \frac{\Omega_\varphi^2}{2g} \left[ R^2(s)\theta(a - R(s)) + a^2(2 - a^2/R^2(s))\theta(R(s) - a) \right] \quad (4.2)$$

и описывает формирующуюся вихревую воронку [3].

Были получены уравнения, описывающее движение центра масс маркера в форме диска радиуса  $\rho$ .

$$\begin{aligned} s &= \sigma(t) + \varepsilon \frac{a^2}{\sigma(t)} (1 + \lambda^2) \ln \frac{\sigma(t)}{s_0} + o(\varepsilon) \\ \varepsilon &= \Omega_s / \mu \ll 1, \quad \lambda = \Omega_\varphi / \Omega_s \\ \sigma(t) &= \sqrt{s_0^2 - 2a^2\Omega_s t}, \quad \mu = \kappa S / m \end{aligned} \quad (4.3)$$

Частота вращения маркера относительно своего центра масс определяется выражением:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{\beta\mu}{2} (\varphi e^{-\mu t} - \varphi_0) + \frac{1}{2} \left[ \frac{\dot{\varphi}_0}{1 + 4\varepsilon\dot{\varphi}_0/\Omega_\varphi} - \frac{\dot{\varphi}}{1 + 4\varepsilon\dot{\varphi}/\Omega_\varphi} \right] \\ \beta &= \frac{s_0^2 \dot{\varphi}_0}{a^2 \Omega_\varphi}, \quad \dot{\varphi}_0 = \dot{\varphi}|_{t=0} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Угол вращения маркера относительно собственной оси определяется выражением

$$\gamma = \int_0^t \omega dt = \frac{\beta}{2} \left[ \varphi_0 - \varphi e^{-\mu t} - \int_0^t \dot{\varphi} e^{-\mu t} dt \right] - \frac{1}{2} (\varphi - \varphi_0) \quad (4.5)$$

Величина  $\varphi - \varphi_0$  в выражении (4.5) – угол поворота центра масс относительно оси вращения вихревой воронки. Так как, согласно (4.5)

справедливы оценки  $\int_0^t \dot{\varphi} e^{-\mu t} dt \sim \lambda\varepsilon$ ,  $\beta \approx 1$ , то главный член в выражении (4.5)

имеет вид

$$\gamma \approx -\frac{1+\beta}{2} (\varphi - \varphi_0) + \frac{\beta}{2} \varphi (1 - e^{-\mu t}) \quad (4.6)$$

а это означает, что при нахождении маркера в области периферии происходит его вращение вокруг собственной оси в направлении обратном к направлению вращения центра масс маркера относительно оси вихревой воронки.

Важная особенность полученных выражений состоит в том, что при использовании главных членов в выражениях для координат  $s$  и  $\varphi$  центра масс маркера эти координаты, как в области твердотельного вращения, так и на периферии вихревой воронки связаны соотношением общего вида

$$s \approx \tilde{s} \exp \left( -\frac{\Omega_s}{\Omega_\varphi} (\varphi - \tilde{\varphi}) \right) \quad (4.7)$$

где  $\tilde{s}$ ,  $\tilde{\varphi}$  – некоторые постоянные величины.

Уравнение (4.7) описывает логарифмическую спираль на поверхности вихревой воронки, по которой движется центр масс маркера, причём эта спираль совпадает с траекториями жидких частиц вблизи свободной поверхности.

На рис. 16 представлены графики зависимости углов поворота маркера относительно собственного центра (угла вращения  $\gamma$ ) и центра течения  $\psi$ .

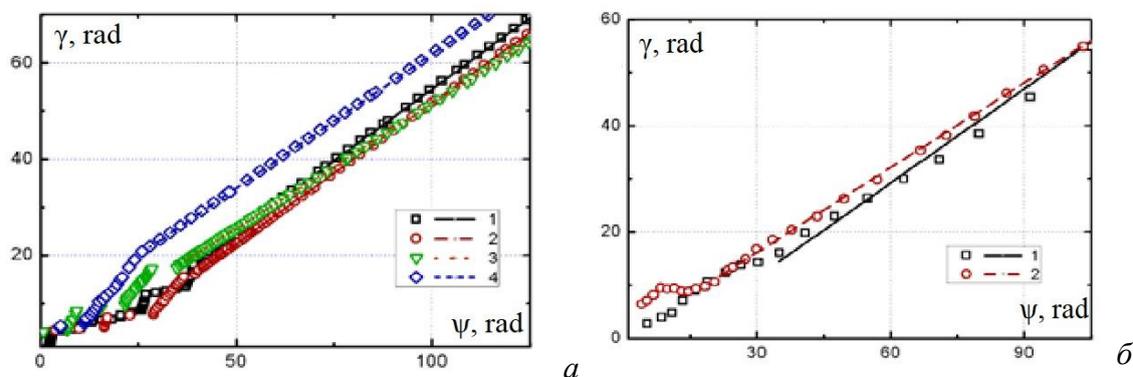


Рисунок 16 – Зависимость угла вращения маркера вокруг собственной оси  $\gamma$  от угла вращения вокруг центра  $\psi$  ( $\Omega = 3,3 \text{ s}^{-1}$ ): а) прямоугольный маркер 1, 2 –  $0,5 \times 1,0 \times 0,3 \text{ см}$ ,  $H = 40$  и  $20 \text{ см}$ ; 3, 4 –  $1,0 \times 2,0 \times 0,3 \text{ см}$ ,  $H = 20$  и  $40 \text{ см}$ ; б) крестообразный маркер  $1,5 \times 1,5 \times 0,3 \text{ см}$ : 1, 2 –  $H = 20$  и  $40 \text{ см}$

Необходимо еще раз отметить следующую интересную особенность: после помещения на поверхность вихря в области его периферии маркер в виде диска «подхватывается» потоком жидкости и начинает движение к центру вихря с одновременным обращением его центра масс в том же направлении, в котором вращается вихрь. Одновременно с этим сам маркер начинает вращаться относительно оси, проходящей через его центр масс, в противоположном направлении. По мере продвижения к центру вихревой воронки маркер попадает в переходную область, пересекает границу между твердотельным и периферийным типами вращения вихря и постепенно меняет собственное вращение относительно центра масс на противоположное которое сохраняется после полного перехода маркера в область твердотельного вращения, что соответствует теоретической модели.

Как в периферийной области, так и в области твердотельного вращения углы поворота маркера относительно собственной оси и центра масс маркера относительно оси вращения воронки связаны соотношением вида  $\gamma = \psi/2$ , которое справедливо для всех форм маркера, имеющих центральную симметрию.

Также в Главе 4 приведены результаты экспериментальных исследований спонтанного вращения ледяных блоков разных размеров, помещенных как на твердую поверхность (алюминий, полиметилметакрилат, стекло, пенопласт, керамика), так и на поверхность бассейна с покоящейся водой определенной глубины при заданной температуре и предложено объяснение механизма возникновения самопроизвольного вращения льда.

В Главе 5 классифицированы возможные источники разливов нефти и нефтепродуктов, вероятные риски разливов нефти при ее добыче на суше и на морском шельфе, а также при хранении и транспортировке нефти и нефтепродуктов вследствие аварий. При попадании на поверхность воды нефть сразу начинает претерпевать изменения, связанные с воздействием различных физико-химических факторов. Такое взаимодействие нефти с окружающей

средой можно разделить на несколько стадий: растекание, испарение, растворение, эмульгирование, рассеивание, окисление, диспергирование. Растекание нефти на открытой воде происходит под действием ветра, поверхностных течений и сил поверхностного натяжения и гравитации, образуя области, покрытые тонкими нефтяными плёнками толщиной в тысячи молекулярных слоёв.

На рис. 17 изображена граница раздела трёх поверхностей:  $\sigma_{wa}$ ,  $\sigma_{wo}$ ,  $\sigma_{oa}$  – силы поверхностного натяжения, действующие нормально к линии контакта вдоль граничных поверхностей “вода – воздух”, “вода – масло” и “масло – воздух” соответственно.

Условие равновесия (неподвижного положения вдоль радиальной координаты) линии контакта трёх веществ имеет вид:

$$\sigma_{wa} + \sigma_{wo} + \sigma_{oa} = 0 \quad (5.1)$$

Выраженное через углы, представленные на рис 5.2.1, соотношение (5.2.1) разбивается на два уравнения:

$$\sigma_{wa} = \sigma_{oa} \cos \alpha_{wa} + \sigma_{wo} \cos \alpha_{wo}, \quad \sigma_{oa} \sin \alpha_{wa} = \sigma_{wo} \sin \alpha_{wo} \quad (5.2)$$

На рис. 18 представлена предполагаемая форма пятна углеводородов на поверхности воды.

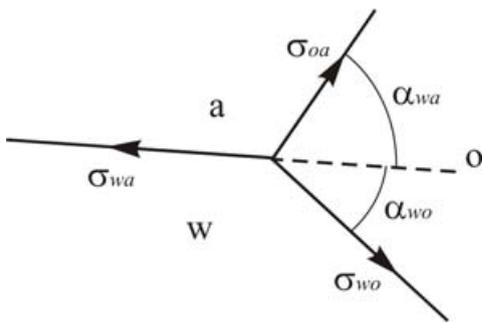


Рисунок 17 – Поверхностные силы на границе раздела трех сред

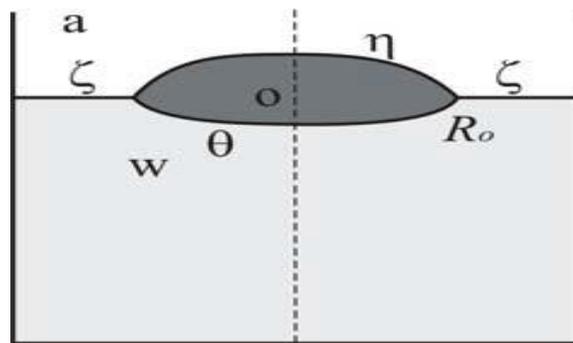


Рисунок 18 – Предполагаемая форма поверхности пятна углеводородов на поверхности воды

Здесь  $\zeta$  – граница вода-воздух,  $\eta$  – граница масло-воздух,  $\theta$  – граница вода-масло,  $R_o$  – радиус пятна.

В данной модели вода и масло считаются несжимаемыми, атмосферное давление – постоянным. Запишем уравнения для давлений воды ( $p_w$ ) и масла ( $p_o$ ) в разных областях системы, где  $R$  – радиус цилиндрического сосуда, окружающего систему.

$$p_w^{(1)} = p_a + \rho_w g (\zeta - z) + q_w^{(1)}(r, z), \quad \text{при } R_o \leq r \leq R \quad (5.3)$$

$$p_w^{(2)} = p_a + \rho_o g (\eta - \theta) + \rho_w g (\theta - z) + q_w^{(2)}(r, z), \quad \text{при } 0 \leq r \leq R_o \quad (5.4)$$

$$p_o = p_a + \rho_o g (\eta - z) + q_o(r, z), \quad \text{при } 0 \leq r \leq R_o \quad (5.5)$$

Здесь  $q_w^{(1)}(r, z)$ ,  $q_w^{(2)}(r, z)$  и  $q_o(r, z)$  являются частями полей давления из-за поверхностного натяжения.

Для описания граничных условий, границы раздела между веществами задаются соотношениями вида:

$$S_{wa} : z = \zeta(r); \quad S_{oa} : z = \eta(r); \quad S_{wo} : z = \theta(r) \quad (5.6)$$

Тогда динамические уравнения примут следующий вид:

$$p_w^{(1)} - \sigma_{wa} K_{wa} \Big|_{z=\zeta(r)} = Pa, \quad (5.7)$$

$$p_o - \sigma_{oa} K_{oa} \Big|_{z=\eta(r)} = Pa, \quad p_w^{(2)} - p_o - \sigma_{wo} K_{wo} \Big|_{z=\theta(r)} = 0$$

Здесь  $K_i$  – кривизны поверхностей раздела, которые вычисляются по формуле

$$K(f) = - \frac{f_{rr}'' + (1 + f_r'^2) f_r' / r}{(1 + f_r'^2)^{3/2}} \quad (5.8)$$

где в качестве функции  $f$  подставляется форма соответствующей поверхности:  $\zeta(r)$ ,  $\eta(r)$  или  $\theta(r)$ .

На границе трёх сред, то есть при  $r = R_o$ , выполняется условие непрерывности физических полей. В модели не учитывается испарение, поэтому можно записать условия сохранения объёма для воды и масла соответственно:

$$\int_{R_0}^R \zeta(r) r dr + \int_0^{R_0} \theta(r) r dr = \frac{HR^2}{2}, \quad 2\pi \int_0^{R_0} (\eta(r) - \theta(r)) r dr = V_o \quad (5.9)$$

где  $V_o$  – заданный объём масла.

На границе с обечайкой поверхность воды должна составлять вполне определённый фиксированный угол смачивания  $\alpha_w$ , величина которого зависит от характеристик материала обечайки, то есть имеет место граничное условие

$$\zeta_r' \Big|_{r=R} = \text{ctg} \alpha_w \quad (5.10)$$

Из граничных условий следует соотношение:

$$\sigma_{wa} K_{wa} = \sigma_{oa} K_{oa} + \sigma_{wo} K_{wo} \quad (5.11)$$

$$\rho_w g \zeta + \sigma_{wa} K_{wa} \Big|_{z=\zeta(r)} = a, \quad \rho_o g \eta + \sigma_{oa} K_{oa} \Big|_{z=\eta(r)} = b, \quad (5.12)$$

$$(\rho_w - \rho_o) g \theta + \sigma_{wo} K_{wo} \Big|_{z=\theta(r)} = a - b$$

здесь  $a$  и  $b$  - некоторые константы.

Соотношения (5.12) описывают чечевицу нефти, лежащую на поверхности воды, как это показано на рис. 18.

Получены численные решения для установившейся формы пятна углеводородов на поверхности покоящейся воды (рис. 19).

В данной работе было проведено экспериментальное исследование динамики растекания пятна углеводородов на поверхности воды при различных условиях. Эксперименты проводились с различными видами органических и минеральных масел и непосредственно с нефтью. В качестве базовой жидкости использовалась вода различной температуры, как пресная, так и с различными значениями солёности. Широкие рамки изменчивости определяющих параметров позволяют изучать базовые свойства течений с учетом основных критериев подобия и условий моделирования.

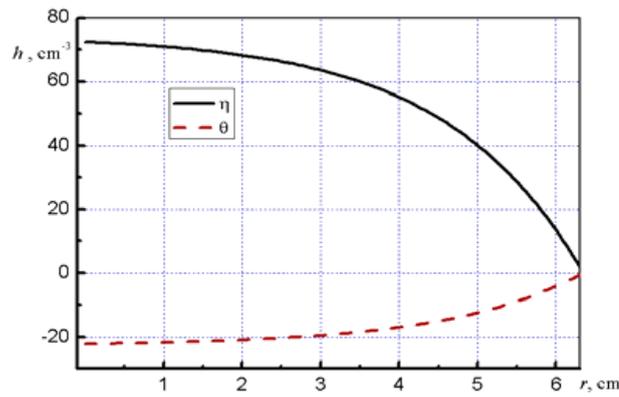


Рисунок 19 – Рассчитанная форма поверхности пятна углеводородов на поверхности воды

На рис. 20 представлены результаты экспериментальных исследований процесса растекания углеводородов с различными физико-химическими свойствами по поверхности воды.

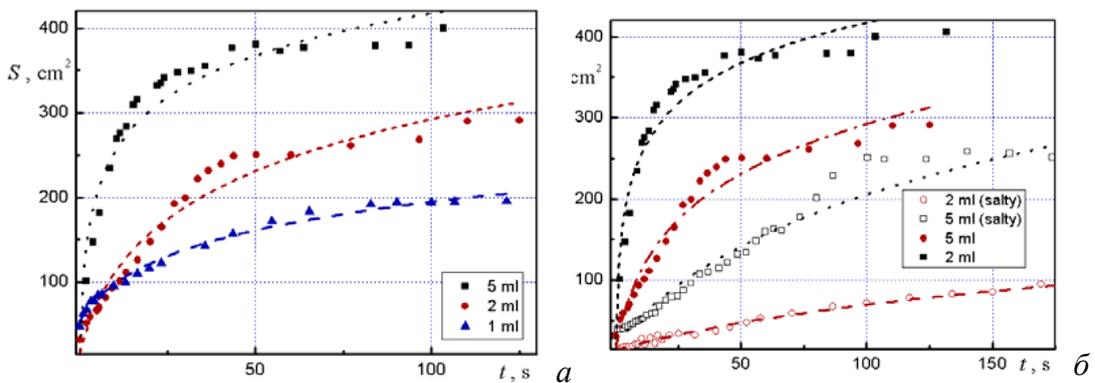


Рисунок 20 – Зависимость площади нефтяного пятна от времени при  $T = 20^\circ$ : а) различные объемы 1 мл, 2 мл, 5 мл; б) динамика растекания нефти в пресной и соленой ( $S = 35 \text{ ‰}$ ) воде.

По воде с содержанием соли углеводороды растекаются медленнее, чем по пресной воде. В условиях более теплой подстилающей жидкости процесс растекания проходит быстрее, чем при нормальных условиях. Прослежена зависимость скорости растекания пятна углеводородов от начального объема, вязкости и поверхностного натяжения.

В Главе 5 также приводится обзор существующих методик и сорбентов для ликвидации углеводородов с поверхности воды, изучены их характеристики и принцип работы устройств, которые в настоящее время используются для ликвидации разливов нефти. Предложен оригинальный способ ликвидации разливов углеводородов с помощью природного сорбента – натуральной овечьей шерсти. В ходе проведенных экспериментов выяснено, что необработанная овечья шерсть массой  $m_w = 1 \text{ г}$  гарантированно впитывает от 6 г нефти и других углеводородов (дизельное топливо, подсолнечное масло) (рис. 21).

После размещения выбранного количества сорбирующего материала на поверхности воды (в приведенном на рис. 21, а опыте – 2 г очеса натуральной

овечьей шерсти), начался процесс сорбции, который нарушает равномерность толщины пятна нефти на свободной поверхности.

Внесение на поверхность двухслойной системы нефть-вода сорбента приводит к формированию течений, различных невооруженным взглядом, под действием которых меняется распределение нефти на поверхности воды (рис. 21, б).

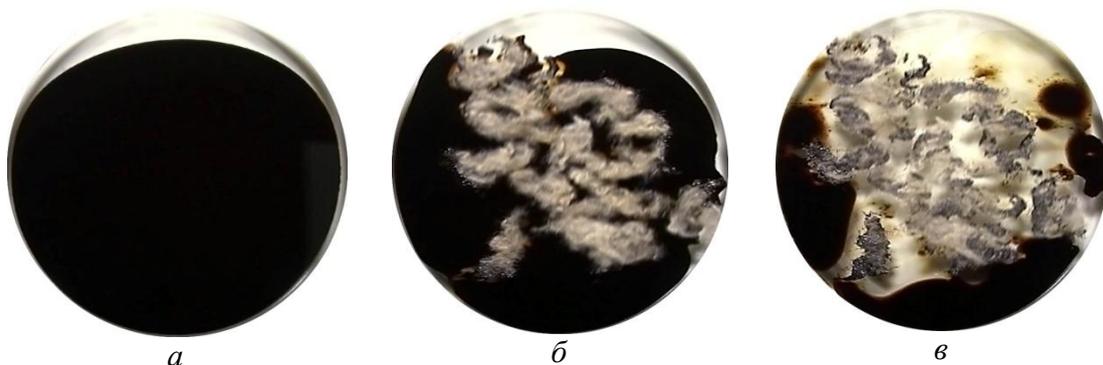


Рисунок 21. Эволюция картины распределения нефти по поверхности воды в кювете в течении, индуцированном сорбцией на волокнистом материале: а) –  $t = 0$  с; б) –  $t = 10$  с,  $m = 2$  г; в) –  $t = 600$  с.

От основного пятна загрязнения на поверхности отделяются капли нефти, скорость перемещения которых позволяет судить об интенсивности течений, индуцированных сорбцией. Рассчитанные значения скоростей смещения отдельных капель представлены на рис. 22, капли имели различные размеры (видимый поперечный размер капель от 0.6 до 3.3 мм).

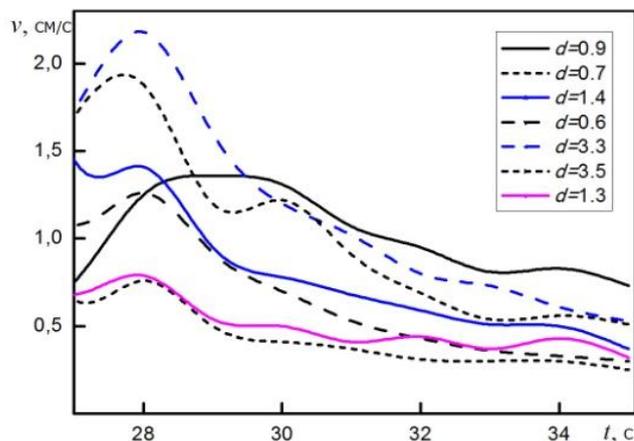


Рисунок 22. Скорости движения капель нефти различного размера в течении, индуцированном сорбцией.

Для анализа проб воды, взятых на различных стадиях процесса очистки воды от нефтяных загрязнений, была использована разработанная в лаборатории «Лазерной спектроскопии водных сред и лазерной биофотоники» физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова процедура нормировки интенсивности флуоресценции нефтепродуктов на интенсивность полосы Рамановского (комбинационного, КР) рассеяния света молекулами среды – в нашем случае, воды или гексана [33]. Приведенные в Табл. 3 значения соответствуют степени очистке воды от загрязнений нефтепродуктами последовательно двумя

одинаковыми порциями сорбента (овечьей шерсти). Данные об образце № 1 соответствуют пробе воды, взятой до начала процесса очистки. Образцы № 2 и 3 – данные после первого и второго применения сорбента массой 1 г соответственно.

Эффект формирования течений в покоящейся жидкости при сорбции нефтепродуктов и масел на волокнистых материалах, и в частности натуральной овечьей шерсти, может использоваться для повышения эффективности технологий ликвидации разливов углеводородов и очистки природных водоемов.

Автором диссертационной работы был получено 2 Патента на полезную модель №136453, «Устройство для отделения жидких углеводородов от воды», 2014, № 169140 «Устройство для сбора жидких углеводородов», 2017 [26, 28].

Образец	Концентрация нефти, мг/л	Степень очистки, %
№ 1	368	-
№ 2	89	76 %
№ 3	4.5	89 %

Таблица 3. Значения концентрации нефти в образцах воды после двух последовательных операций очистки овечьей шерстью.

Основным преимуществом разрабатываемого устройства для сбора жидких углеводородов с поверхности воды является сравнительно низкая себестоимость и экологическая безопасность его использования, а также возможность многократного (4 - 5 раз) использования.

**В Заключение** кратко перечислены основные результаты диссертации, которые состоят в следующем:

Выполнены экспериментальные исследования вихревых течений в контейнерах различной геометрии, а также при различных физических параметрах экспериментов на оригинальных установках, модернизированных для изучения динамики формирования, структуры установившего течения и картины переноса вещества в вихревых течениях в широком диапазоне определяющих параметров. Оработана методика сбора и обработки экспериментальных данных.

Установлено, что форма свободной поверхности зависит от всех физических параметров задачи (глубины слоя жидкости, радиуса и формы активатора, частоты вращения). Глубина каверны монотонно растет с увеличением частоты вращения.

Всего в экспериментах наблюдались поверхностные каверны трех видов - гладкие, с инерциальными (крупномасштабными) волнами и сложные (с инерциальными и спиральными волнами одновременно). Получена теоретическая зависимость, которая описывает универсальную геометрию вихревых каверн, возникающих в цилиндрических сосудах при вращении соосного диска, и совпадает как с экспериментальными данными, так и с полученной ранее моделью вихревого течения.

Результаты экспериментов позволили предположить, что форма свободной поверхности допускает группу собственных ортогональных преобразований  $SO_6(2)$ .

Впервые получены аналитические выражения, показывающие, что траектории жидких частиц вблизи поверхности вихря представляют собой трехмерные спирали, по которым происходит течение от периферии к центру вихря. Показано, что рассчитанные и визуализированные траектории жидких частиц хорошо согласуются между собой и относятся к классу пространственных логарифмических спиралей.

Проведенные эксперименты по определению основных характеристик процесса распространения растворимой примеси в толщу жидкости в составном вихревом течении подтвердили линейный характер зависимости глубины проникновения примеси вблизи вертикальной оси течения от времени, прослежено изменение формы и размеров окрашенной области, рассчитана скорость изменения опускания красителя в толщу жидкости в зависимости от частоты вращения индуктора. Растворимые красители образуют спиральные рукава, составляющие картину переноса вещества на вращающейся поверхности жидкости. Направления основного течения и роста спиральных рукавов противоположны. Рост спиральных рукавов происходит во всем диапазоне исследованных параметров течения.

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.

Экспериментально изучена тонкая структура поверхностей раздела нефтяное тело – вода и жидкость (вода или несмешивающиеся углеводороды) – воздух в составном вихре, включая режим начала формирования эмульсий. Проведенные эксперименты показали, что в исследуемом вихре, как в пресной, так и в соленой воде несмешивающиеся жидкости (такие как масло, нефть, дизельное топливо) частично остаются на свободной поверхности, частично затягиваются в толщу жидкости, где образуют связанное масляное тело в окрестности оси вращения. Геометрия контактной поверхности зависит от параметров вихревого течения, задаваемых угловой скоростью вращения индуктора, и состава среды. На границе раздела масляного тела и подстилающей жидкости, как и на поверхности каверны в чистой жидкости, наблюдаются два типа возмущений – крупномасштабные инерциальные волны и мелкомасштабные спиральные волны.

К масляному пятну на поверхности вращающейся жидкости примыкают спиральные рукава, ориентированные навстречу основному течению. Масло в толще составного вихря собирается в компактное тело, ограниченное поверхностью вращения. Размеры и форма масляного тела и примыкающих рукавов зависят от параметров течения. Сравнение размеров масляного тела в зависимости от количества и физических свойств добавленной в поток несмешивающейся примеси для различных начальных значений глубины слоя воды показывает, что увеличение вязкости маркирующей добавки ведет к уменьшению вертикального размера масляного тела.

Во всех проведенных экспериментах примесь не может считаться пассивной, смещения отдельных полос, положение капель масла и ориентация спиральных рукавов не отражают картину течения в составном вихре.

Показано, что распад масляного тела может происходить в нескольких формах, потеря сплошности поверхности раздела зависит от типа примеси. Вид образующийся эмульсии зависит от частоты вращения: при средних угловых

скоростях вращения формируется прямая эмульсия, с увеличением скорости наблюдаются оба вида, а при больших скоростях – инвертная эмульсия.

Впервые рассмотрена задача аналитического определения формы масляного тела в составном вихре на основе анализа уравнений механики разноплотных жидкостей с физически обоснованными граничными условиями. Получены зависимости, отражающие форму границ раздела фаз в вихревом течении жидкости, состоящей из двух компонент. Аналитические выражения, характеризующие форму нулевого приближения для границ раздела фаз в составном вихре, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Экспериментально показано, что при помещении твердотельного маркера на поверхность вихря в области его периферии он начинает движение к центру вихря с одновременным обращением его центра масс в том же направлении, в котором вращается вихрь, при этом сам маркер начинает вращаться относительно оси, проходящей через его центр масс, в противоположном направлении. По мере продвижения к центру вихревой воронки маркер попадает в переходную область, пересекает границу между твердотельным и периферийным типами вращения вихря и постепенно меняет собственное вращение относительно центра масс на противоположное, которое сохраняется после полного перехода маркера в область твердотельного вращения, что соответствует теоретической модели.

Предложена теоретическая модель, объясняющая движение маркеров, помещенных на поверхность вихревого течения в однокомпонентной жидкости. Получено уравнение, описывающее движение центра масс маркера и представляющее логарифмическую спираль на поверхности вихревой воронки, которая совпадает с траекториями жидких частиц вблизи свободной поверхности. Как в периферийной области, так и в области твердотельного вращения углы поворота маркера относительно собственной оси и центра масс маркера относительно оси вращения воронки связаны соотношением вида  $\gamma = \psi/2$ , которое справедливо для всех форм маркера, имеющих центральную симметрию. Экспериментальная зависимость угла вращения от угла поворота в области вращения твердого тела хорошо согласуется с теоретической зависимостью, полученной на основе предложенной математической модели.

Проведенные эксперименты по размещению на свободной поверхности составного вихря твердотельного маркера с нанесенным растворимым красителем наглядно демонстрируют наличие опережающего и запаздывающего относительно твердотельного маркера рукавов красителя. Подкрашивающая примесь распространяется по свободной поверхности составного вихревого течения порциями, отходя от маркера как вперед, так и назад приблизительно в одно и то же время, и временные интервалы между образованием новых порций приблизительно равны.

Исследовано спонтанное вращение ледяных блоков разных размеров, помещенных как на твердые поверхности (алюминий, полиметилметакрилат, стекло, пенопласт, керамика), так и на поверхность бассейна с покоящейся водой определенной глубины при заданной температуре. При плавлении ледяной блок служит источником вихревого течения, возникающего под его погруженной поверхностью. Непрерывный процесс таяния льда порождает непрерывный поток массы, направленный против вектора силы тяжести.

Проведены экспериментальные исследования процесса растекания углеводородов из компактного пятна по поверхности воды при различных

физических условиях – температуре и солености. По воде с содержанием соли углеводороды растекаются медленнее, чем по пресной воде. В условиях более теплой подстилающей жидкости процесс растекания проходит быстрее, чем при нормальных условиях. Прослежена зависимость скорости растекания пятна углеводородов от начального объема, вязкости и поверхностного натяжения. Впервые получены дифференциальные уравнения, определяющие форму масляного тела в предположении равенства угловых скоростей вращения масляного тела и окружающей жидкости (гипотеза «вмороженности масляного тела»). Получены численные решения для установившейся формы пятна углеводородов на поверхности покоящейся воды.

Проведены экспериментальные исследования сорбирующей способности различных материалов по отношению к нефтепродуктам, их водопоглощения и применения для ликвидации загрязнений поверхности воды углеводородами. Проведенная флуоресцентная диагностика процесса очистки воды от нефтяных загрязнений сорбентом на основе овечьей шерсти, показала, что шерсть сорбирует до 89% нефти в зависимости от ее начальной концентрации и количества сорбента.

Эффект формирования течений в покоящейся жидкости при сорбции нефтепродуктов на волокнистых материалах, и в частности натуральной овечьей шерсти, может использоваться для повышения эффективности технологий ликвидации разливов углеводородов и очистки природных водоемов.

#### **Публикации автора по теме диссертации:**

Статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК РФ и/или индексируемых в Web of Science/Scopus: 33, статьи в других научных изданиях: 12, материалы докладов на научных конференциях: 47, учебно-методические пособия и монографии: 24, патенты: 3.

#### **Статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в Web of Science/Scopus:**

1. Chaplina T.O. Experimental study of substance transfer in vortex and wave flows in multicomponent media // *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes*, 2019, P. 159-174.
2. Chaplina T.O. Transport of oil in Compound Vortex // *Special Issue: IUTAM 2012 Symposium on Waves in Fluids: Effects of Nonlinearity, Rotation, Stratification and Dissipation*. 2013. V. 8. P. 58 – 64.
3. Кистович А.В., Чаплина Т.О., Степанова Е.В. Спиральная структура траекторий жидких частиц вблизи поверхности вихря // *Вычислительные технологии*. 2019 Том 24, № 2, 2019, С. 67-77.
4. Степанова Е.В., Чаплина Т.О. Формирование вихревого течения тающим ледяным маркером // *Прикладная математика и механика*. 2019. № 3, С. 502–509.
5. Chaplina T.O., Stepanova E.V., Pakhnenko V.P. Features study of the marks movement on the surface and in the depth of vortex flow // *Springer Geology, Processes in GeoMedia*, 2020, V. I, P. 2-16.
6. Chaplina T.O., Karev V.I., Stepanova E.V. Experimental and analytical study submerged jet // *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes*, Springer, V. I, 2019, P. 75-83.

7. Kistovich A.V., Chaplina T.O., Stepanova E.V. Analytical and experimental study of the substance transport in the vortex flow // *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 2019, 10, P. 1-16.
8. Kistovich A.V., Pokazeev K.V., Chaplina T.O. The Mathematical Model of Acoustic Processes // *Ocean Acoustics*, Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment, 2020, P. 1-12.
9. Kistovich A.V., Chaplina T.O., Stepanova E.V. Vortex flow with free surface: comparison of analytical solutions with experimentally observed liquid particles trajectories // *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 2017, V. 44, № 3, P. 215-227.
10. Chaplina T.O., Stepanova E. V. Elimination of Hydrocarbons Spills on Water Objects and Fluorescent Diagnostics of Water Purity // *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes*, 2018, P.17-28.
11. Чаплина Т.О., Кистович А.В., Степанова Е.В. Теоретические и экспериментальные исследования границ раздела двух несмешивающихся жидкостей в вихревом течении со свободной поверхностью // *Вестник МГУ, серия 3. Физика. Астрономия*, 2016, №4. С. 99-105.
12. Budnikov A.A., Chaplina T.O., Pokazeev K.V. The movement of bodies of various sizes and shapes on the surface of the vortex *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 2016, Vol. 43, No. 4, P. 368-374.
13. Chaplina T.O., Chashechkin Yu.D. Coherent structure in oil body embedded in compound vortex // *Advances in Computation, Modeling and Control of Transitional and Turbulent Flows*. 2016. P. 219-224.
14. Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д., Степанова Е.В. Течения, индуцированные сорбцией на волокнистом материале, в двухслойной системе нефть-вода // *Доклады РАН. Техническая физика*, том 470, № 1, С. 38–42.
15. Чаплина Т.О., Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. Структурная устойчивость картины переноса несмешивающихся жидкостей в вихревом течении // *Вестник МГУ. Сер. 3. Физ. Астрон.* 2014. № 6. С. 122-127.
16. Чашечкин Ю.Д., Чаплина Т.О., Степанова Е.В. Два вида частичного распада масляного тела в вихревом течении // *Доклады РАН*, 2014, Т. 456, №4, С. 424–427.
17. Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Формы частичного распада масляного тела в составном вихре // *Известия РАН: Механика жидкости и газа*. 2014, № 5, С. 52–64.
18. Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Экспериментальное исследование переноса масла в составном вихре // *Прикладная механика и техническая физика*. 2013. Т. 54. № 3. С. 79-86.
19. Степанова Е.В., Трофимова М.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Структурная устойчивость процесса переноса вещества в составном вихре. *Известия РАН: Физика атмосферы и океана*, 2012, том 48, № 5, С. 1–13.
20. Чаплина Т.О., Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. Особенности переноса примеси в стационарном вихревом течении // *Вестник МГУ. Серия 3: Физика и Астрономия*, 2012. № 4. С. 73 - 79.
21. Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Перенос масла в составном вихре // *Механика жидкости и газа*. 2011. № 2. С. 52-64.

22. Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д., Е.В. Степанова Е.В. Деформация компактного масляного пятна в каверне составного вихря // Доклады РАН. 2010. Т. 432. № 2. С. 184-187.

**Статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК РФ:**

23. Чаплина Т.О., Степанова Е.В., Пахненко В.П. Исследование особенностей перемещения меток на поверхности и в толще вихревого течения // Процессы в геосредах, № 2, 2019, С. 282 – 291.
24. Чаплина Т.О. Исследование переноса несмешивающейся примеси в вихревых течениях в многофазных жидкостях // Процессы в геосредах, 3, 2019, С. 282 – 291.
25. Степанова Е.В., Чаплина Т.О. Моделирование разливов нефти на поверхности воды и метод ликвидации поверхностных загрязнений углеводородами с использованием овечьей шерсти // Теоретическая и прикладная экология №2, 2015, С. 108-115.

**Патенты:**

26. Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Патент на полезную модель №136453, Устройство для отделения жидких углеводородов от воды, Приоритет полезной модели 12 сентября 2013 года, зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 10 января 2014 года.
27. Бардаков Р.Н., Чаплина Т.О. Патент на изобретение № 2564935. Способ маскировки следа подводного аппарата. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 сентября 2015 г.
28. Чаплина Т.О., Степанова Е.В. Патент на полезную модель № 169140 «Устройство для сбора жидких углеводородов», дата государственной регистрации 16.03.2017 г.

**Монографии:**

29. Показеев К.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Введение в оптику океана. М.: МАКС Пресс. 2007. – 176 с. с илл. ISBN 978-5-317-01971-6. (11 уч.изд.л.).
30. Показеев К.В., Чаплина Т.О., Океанология. Оптика океана. М.: Издательство Юрайт, 2018. — 409 с.
31. Кистович А.В., Показеев К.В., Чаплина Т. О. Физика моря: — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 256 с.
32. Чаплина Т.О., Степанова Е.В., Пахненко В.П. Современные методы и средства ликвидации разливов нефти в океане. М.: Издательство «Ким Л.А.», 2019.- 62с. ил.
33. Чаплина Т.О. «Перенос вещества в вихревых и волновых течениях в однокомпонентных и многокомпонентных средах». – М.: Издательство «Ким Л.А.», 2019. – 201 с.
34. Kistovich A.V., Pokazeev K.V., Chaplina T.O. Ocean Acoustics, Springer, 2020, 260 p. (Проиндексирована в Scopus)

ПЕРЕНОС ВЕЩЕСТВА В ВИХРЕВЫХ И ВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЯХ В  
ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ И МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕДАХ

Чаплина Татьяна Олеговна

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Подписано в печать    июля 2020    Заказ № \_\_\_\_\_    Тираж 100 экз.

---

Отпечатано на ризографе Учреждения Российской академии наук Институт  
проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН  
117526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, к. 1.