

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Ахатова Искандера Шаукатовича на диссертацию Чаплиной Татьяны Олеговны на тему «Перенос вещества в вихревых и волновых течениях в однокомпонентных и многокомпонентных средах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы».

1. Актуальность темы диссертационного исследования

В диссертации Т.О. Чаплиной представлены результаты комплексного экспериментально-теоретического исследования структуры вихревых и волновых течений, возникающих в лабораторных и природных условиях, а также в технологических процессах. Рассматриваются случаи переноса трех типов маркеров: твердотельных (льда, пластика), несмешивающихся с водой (нефть, масло, дизельное топливо) и растворимых в воде (анилиновые красители, уранил).

Проблема актуальна с точки зрения фундаментальной гидродинамики. Начало исследованиям вихревых течений жидкости было положено в классической работе Гельмгольца середины 19 века. В дальнейшем эти исследования развивались в работах Бельтрами, фон Кармана, Рэнкина, Кельвина, Прандтля, Жуковского и др. В начале 21 века в России это направление получило активное развитие в работах С.В. Алексеенко, П.А. Куйбина, В.Л. Окулова, А.В. Борисова, И.С. Мамаева, И.С. Соколовского, А.М. Гайфуллина, М.А. Головкина, В.А. Головкина, В.М. Калявкина, и др.

Проблема также актуальна с точки зрения многочисленных приложений, в частности для анализа аварийных ситуации и экологических катастроф связанных с разливом загрязняющих веществ в водоемах.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается корректной постановкой задач, подтверждается повторяемостью экспериментов как качественно, так и с точки зрения количественных значений измеренных величин, использованием адекватных аналитических моделей и совпадением расчётных результатов с измерительными данными. Все результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на многочисленных научных конференциях и семинарах. Имеются патенты на изобретения, полученные при выполнении диссертационной работы.

3. Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Следует отметить три основных результата представленных в диссертации Т.О. Чаплиной, обладающих научной новизной и имеющих практическую значимость:

а) Разработана методика экспериментальных исследований динамики формирования и структуры установившегося вихревого течения, основанная на визуализации и последующем

математическом анализе процессов переноса вещества в вихревых и волновых течениях в широком диапазоне параметров.

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

в) Построена 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.

Результаты диссертационной работы важны для понимания поведения различных примесей в вихревых течениях и более точного прогнозирования их распространения в природных условиях (в гидросфере и атмосфере). Исследование также может создать предпосылки для разработки новых моделей многокомпонентных течений, создания алгоритмов для численного моделирования задач экологии, связанных с распространением и накоплением загрязнителей в природных водоемах, задач, связанных с вопросами борьбы с последствиями разлива нефтепродуктов на поверхности рек и морей в различных климатических зонах. Результаты диссертационной работы важны для более точного прогнозирования распространения различных примесей в природных условиях и могут быть также применены для усовершенствования многочисленных установок по разделению водонефтяных смесей и способов сохранения окружающей среды. Эффект формирования течений в покоящейся жидкости при сорбции нефтепродуктов и масел на волокнистых материалах, и, в частности, натуральной овечьей шерсти, может использоваться в технологиях ликвидации разливов углеводородов и очистки природных водоемов.

Диссертация Т.О. Чаплиной состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Во введении автором обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и основные задачи работы; приведен обзор основных результатов, достигнутых к настоящему времени при изучении поставленной проблемы. Автор описывает методы и подходы, использованные в ходе выполнения работы, показывает обоснованность и достоверность полученных результатов, а также обосновывает теоретическую и практическую значимость результатов и приводит список научных конференций и семинаров, на которых проходила их апробация. Приведены основные результаты работы, их теоретическая и практическая значимость, новизна, обоснованность и достоверность, представлены основные положения, выносимые на защиту, и изложено краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе приведен подробный библиографический анализ современного состояния данной проблемы, приводятся описание экспериментальных установок, используемых для моделирования вихревых течений, описано оборудование, методика лабораторных экспериментов и параметры изучаемых течений. Приводятся необходимые численные данные, характеризующие основные параметры экспериментальных режимов формирующихся течений.

Автором представлена общая модель вихря в цилиндрическом контейнере, выполнены экспериментальные исследования вихревых течений в контейнерах различной геометрии, а также при различных физических параметрах экспериментов. Там же приводится общая модель вихревой каверны и целый ряд характерных безразмерных комплексов, определяющих кинематику и динамику явления. Определены формы каверны составного вихря в чистой воде, геометрия поверхностной каверны и критические условия перестройки течения в составном вихре.

Автором диссертации получена теоретическая зависимость, которая описывает универсальную геометрию вихревых каверн, возникающих в цилиндрических сосудах при вращении соосного диска, и совпадает с экспериментальными данными. 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.

Следует отметить комплексный подход автора к исследованию вихревых течений: лабораторное моделирование и аналитическое описание. Хорошее совпадение форм свободной поверхности, описываемой аналитическими соотношениями, с экспериментально наблюдаемыми при различных параметрах вихревого течения, указывает на применимость развитого в представленной работе упрощенного теоретического описания течения данного вида.

Во второй главе изучается процесс переноса несмешивающихся с водой примесей на поверхности и в толще вихревого течения. Проводится визуализация и качественный анализ течения вблизи поверхности диска-активатора. Рассчитана скорость изменения опускания красителя в толщу жидкости в зависимости от частоты вращения диска. 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. Спирали вблизи активатора и на поверхности жидкости относятся к логарифмическому типу. Следует подчеркнуть, что представленные количественные экспериментальные данные есть результат нового метода измерений, предложенного автором. Проведенные в данной главе исследования важны для понимания механизмов распространения примеси в сложных вихревых структурах. Используемая в диссертации методика позволила получить результаты, пригодные для дальнейшего изучения вихревых структур.

В третьей главе исследованы многокомпонентные среды, одной из которых обязательно была вода. Представлены результаты экспериментального исследования переноса несмешивающихся с водой примесей (касторовое, подсолнечное, машинное и авиационное масла, дизельное топливо, нефть, мазут и др.) на свободной поверхности и в толще вовлеченной в вихревое движение жидкости, включая режим формирования эмульсий. Рассмотрена задача аналитического определения формы масляного тела в составном вихре на основе анализа уравнений механики разноплотных жидкостей с физически обоснованными граничными условиями. Получены точные аналитические выражения, характеризующие форму поверхности раздела фаз для составного вихря, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В четвёртой главе приведены результаты исследования движения макроскопических маркеров различной формы, помещённых на свободную поверхность вихревой воронки с целью визуализации вихревых течений и измерения характеристик таких течений на основе анализа перемещений маркеров. Эксперименты проводились как в однокомпонентной, так и в многокомпонентных средах. В главе приведён обширный иллюстративный материал обработанных количественных данных. Автором предложена теоретическая модель, объясняющая движение маркеров, помещённых 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 твёрдого тела хорошо согласуется с теоретической зависимостью, полученной на основе предложенной математической модели. Достоинство этой части работы – это также комплексный подход к изучению перемещения твёрдых маркеров в вихревых течениях: лабораторное моделирование и аналитическое описание. В заключительной части главы представлены результаты экспериментальных исследований собственных свойств маркеров, изготовленных из льда с целью дальнейшего моделирования вихревого переноса в океане не только скоплений мусора, но и ледяных полей. Было обнаружено самопроизвольное вращение ледяных маркеров в форме диска как на твёрдой поверхности, так и при помещении на свободную поверхность жидкости.

В пятой главе представлены результаты лабораторного моделирования разлива нефтепродуктов по поверхности моря. Представлена аналитическая модель равновесной формы загрязняющего вещества и получены её численные решения для различных реальных веществ, растекающихся по поверхностям природных водоёмов. Автором приводятся результаты экспериментального исследования процесса растекания углеводородов с различными физико-химическими свойствами по поверхности воды, а также сравнение полученных аналитически выражений, описывающих установившуюся форму поверхности пятна углеводородов на поверхности воды, с наблюдаемыми в экспериментах формами для различных значений параметров эксперимента. Также в Главе 5 проведён обзор основных методов очистки поверхностей от нефтепродуктов и предложен запатентованный метод их адсорбции шерстяными волокнами. Приведены количественные результаты, подтверждающие эффективность предложенных авторов способов очистки и предложены устройства, позволяющие проводить утилизацию адсорбированных нефтепродуктов и добиваться повторного использования адсорбента.

4. Наиболее существенные научные результаты, полученные лично соискателем

Диссертация Т.О. Чаплиной, в целом, представляет собой описание работ большого коллектива соавторов. И это не удивительно, так как развитие экспериментально-теоретических проектов такого масштаба, требует объединённых усилий и экспертизы ученых разного профиля. Надо отметить, что в тексте автор четко выделяет те работы, которые выполнены им лично (стр. 18 диссертации). А именно, подготовка и проведение экспериментов, модернизация экспериментального оборудования, обработка и анализ экспериментальных данных, разработка и валидация математических моделей, и т.д. Все эти работы составляют надежную основу для докторской диссертации и позволяют

утверждать, что три основных результата диссертации Т.О. Чаплиной описанные выше в разделе 3 получены автором лично.

5. Соответствие автореферата диссертации

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Замечания

1. Формула для Числа Атвуда в таблице 1.2.3 не совпадает с формулой, приведенной в тексте на стр.37.
2. Уравнение неразрывности (1.3.1) названо в тексте «уравнение неразрывности Даламбера».
3. На стр. 116 записаны динамические граничные условия (3.1.3), в которых использован коэффициент поверхностного натяжения σ без индекса. Но здесь описывается система трех флюидов – вода, масло и воздух. Кроме того, на Рис. 3.1.1 используется другая система обозначений.
4. При описании составного вихря из двух несмешивающихся компонент вода-масло на стр. 116 сказано без обоснования, что «эффекты поверхностного натяжения считаются малыми и не принимаются во внимание». В случае однокомпонентного вихря, когда исследуется форма поверхности, пренебрежение поверхностным натяжением легко оправдать незначительной кривизной поверхности. В случае двухкомпонентного вихря поверхностное натяжение определяет углы на линии контакта вода-масло-воздух, и поэтому пренебрежение поверхностным натяжением должно быть дополнительно обосновано.
5. На стр. 218 приведен неверный знак неравенства в критерии растекания по Гаркинсу.
6. На стр. 223 в условии равновесия линии контакта трех веществ (5.2.1) нужно использовать векторные обозначения.
7. На стр. 253 в Выводах к Гл. 5 сказано, что «впервые получены дифференциальные уравнения, определяющие форму масляного тела в предположении равенства угловых скоростей вращения масляного тела и окружающей жидкости». Однако в Гл. 5 рассмотрена задача описания «чечевицы масла, лежащей на поверхности воды» без вращения.

Заключение

Приведенные замечания не снижают ценности и качества научных исследований, результаты которых представлены в диссертации Т.О. Чаплиной., и в целом диссертационная работа заслуживает высокой оценки.

Диссертация прошла апробацию на всероссийских и международных конференциях и научных семинарах. Выносимые на защиту научные положения достаточно полно отражены в 34 публикациях, из них 25 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК и

индексируемых в Web of Science/Scopus, в том числе в ведущих рецензируемых журналах, таких как Доклады академии наук, Механика жидкости и газа, Прикладная математика и механика. Опубликованные работы соответствуют тематике диссертации.

Диссертация Т.О. Чаплиной является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей значение для развития гидродинамики и механики многофазных систем.

Считаю, что представленная диссертация «Перенос вещества в вихревых и волновых течениях в однокомпонентных и многокомпонентных средах» соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор Т.О. Чаплина заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент

Искандер Шаукатович Ахатов
доктор физико-математических наук, профессор
Директор Центра проектирования, производственных технологий и материалов
Сколковского института науки и технологий
Территория Инновационного центра «Сколково»
121205, Москва, Большой Бульвар 30с1, офис Е-В5-2020
тел. +7 (495) 280 14 81 доб. 3317; моб. +7 (916) 690 13 34
i.akhatov@skoltech.ru; www.skoltech.ru

Подпись Ахатова И. Ш. подтверждаю
Менеджер по персоналу
Татьяна Геннадьевна Почепцова

