

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента  
на диссертационную работу  
**Чаплиной Татьяны Олеговны**  
«Перенос вещества в вихревых и волновых течениях в однокомпонентных и  
многокомпонентных средах»,  
представленную на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

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

**Актуальность темы работы.** Диссертационная работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию 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). Вихревые течения широко распространены в природных условиях и используются в различных технических приложениях. Проблема переноса вещества в циркуляционных течениях до сих пор является весьма актуальной и востребованной для гидрофизики, экологии и промышленных технологий и имеет множество различных прикладных приложений. Несмотря на большое количество исследований, данная область остается недостаточно изученной, поскольку такие задачи, как правило, зависят от большого числа случайных и трудно контролируемых факторов и являются весьма сложными для экспериментального изучения, однозначной интерпретации и теоретического описания. В этой связи весьма актуальна разработка методики экспериментального лабораторного моделирования, призванного обеспечить стационарность течений и воспроизводимость результатов, и создание адекватной теоретической модели исследуемых процессов.

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

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

**В первой главе** приведен достаточно 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.

Также в главе 1 рассмотрена общая модель вихря в цилиндрическом контейнере, выполнены экспериментальные исследования вихревых течений в контейнерах различной геометрии, а также при различных физических параметрах экспериментов. 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. Представленное далее аналитическое описание формы поверхности вихревой воронки даёт хорошее совпадение с экспериментальными результатами. В диссертационной работе представлены аналитические выражения, показывающие, что траектории жидких частиц вблизи поверхности вихря представляют собой трехмерные спирали, по которым происходит течение от периферии к центру вихря.

Также автором проведено подробное исследование течения в окрестности активаторного диска, показавшее также спиральную структуру траекторий жидких частиц, разгоняемых и отбрасываемых диском, подтверждённое сравнением с экспериментальными результатами.

**Вторая глава** посвящена исследованию поведения растворимых примесей на поверхности и в толще вихревых течений. Созданные экспериментальные установки позволяют воспроизводить условия опытов и исследовать устойчивые компоненты сложной картины переноса маркирующей примеси в составном вихревом течении.

В данной главе 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. Рассчитана скорость изменения опускания красителя в толщу жидкости в зависимости от частоты вращения индуктора. Экспериментально доказана структурная устойчивость процесса переноса красителя в вихревом течении. Проведены измерения толщины спиральных рукавов. Экспериментально доказана изгибная, а не варикозная неустойчивость центральной части вихревого течения.



Проведённая численная аппроксимация траекторий движения подкрашенных частиц жидкости в виде логарифмических спиралей дала хорошее совпадение с количественными результатами экспериментальных исследований. Здесь необходимо особенно 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** представлены результаты экспериментальных исследований переноса несмешивающейся примеси (касторовое, подсолнечное, машинное и авиационное масла), а также 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. Особенности полученных аналитических выражений для формы границ раздела фаз в вихревом течении накладывают существенные ограничения на свойства используемых несмешивающихся добавок, т.к. для точного определения всех параметров границ раздела фаз необходима низкая оптическая плотность, и на применяемые средства визуализации, которые должны обеспечивать необходимое разрешение изображения для проведения измерений формы поверхностей раздела.

Разработана методика исследования распространения различных примесей в вихревых течениях, позволяющая проводить эксперименты в чистой, в соленой воде, а также в воде с содержанием углеводов и спирта.

В Главе 3 также было проведено исследование устойчивости поверхности раздела вода – масло. Показано, что распад масляного тела может происходить в нескольких формах. При распаде масляного тела 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.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований твердотельных маркеров разных форм и размеров в вихревом течении в многофазных жидкостях и предложена теоретическая модель, объясняющая движение маркеров, помещенных на поверхность вихревого течения в однокомпонентной жидкости. 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. Также в Главе 4 приведены измерительные результаты исследований перемещений маркера с внедрением в его край визуализирующей примеси, что позволяет отследить структуру течения вблизи маркера, увлекаемого потоком вихря.

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. Автором приводятся результаты исследования процесса растекания углеводородов с различными физико-химическими свойствами по поверхности воды, а также сравнение полученных аналитически выражений, описывающих установившуюся форму поверхности пятна углеводородов на поверхности воды, с наблюдаемыми в экспериментах формами для различных значений параметров эксперимента. Приводятся результаты исследования процесса растекания углеводородов с различными физико-химическими свойствами по поверхности воды. Автором получены дифференциальные уравнения, определяющие форму масляного тела и их численные решения для установившейся формы пятна углеводородов на поверхности покоящейся воды.

Также в Главе 5 предложен запатентованный метод ликвидации разливов углеводородов с помощью природного сорбента – натуральной овечьей шерсти. Приведены количественные результаты, подтверждающие эффективность предложенных авторов способов очистки. Также предложены устройства, позволяющие проводить утилизацию адсорбированных нефтепродуктов и добиваться повторного использования адсорбента. Основным преимуществом разрабатываемого устройства для сбора жидких углеводородов с поверхности воды является сравнительно низкая себестоимость и экологическая безопасность его использования.

Каждая глава диссертации завершается выводами, подтверждёнными предшествующим изложением научных результатов.

Основные результаты работы получены автором самостоятельно, о чем свидетельствует детальное представление его личного вклада в опубликованных работах.

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

В диссертации Т.О. Чаплиной представлены результаты, обладающие научной новизной и имеющие практическую значимость:

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).



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

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

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

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

Результаты диссертационной работы способствуют лучшему пониманию процесса переноса вещества в вихревых и волновых течениях в однокомпонентных и многокомпонентных средах и повышению точности его прогнозирования в природных условиях. Данные результаты имеют существенное значение для развития гидродинамики многофазных сред и могут иметь технологические приложения.

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

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

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается корректной постановкой задач, подтверждается воспроизводимостью результатов в пределах точности эксперимента, согласием результатов проведенных экспериментов с данными независимых опытов в диапазоне совпадения параметров, а также совпадением расчётных результатов с измерительными данными.

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

Исследование может создать предпосылки для разработки новых моделей движения компонент многокомпонентных течений, создания программ 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, приведенные в данной диссертационной работе, неоднократно докладывались автором на международных и российских конференциях.

**Рекомендации по использованию результатов диссертации.** Полученные в диссертационной работе результаты позволяют более детально описать динамику и структуру течения, как на поверхности, так и в толще вихря. Проведенные автором исследования показали, что при визуализации течений в жидкости при помощи маркеров необходимо учитывать характеристики самих маркеров и вносить соответствующие поправки при расчетах, что может быть использовано при интерпретации показаний различных зондов-дрифтеров, передающих информацию о морских и океанских течениях.

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 качества 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.

Критическая технология РФ, которой соответствуют результаты исследований «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения».

**Замечания по диссертации:**

1. При описании Главы 3 указывается, в рассматриваемой задаче существуют 3 поверхности раздела: «вода – воздух», «вода – масло» и «масло – воздух», с целью получения аналитического решения эффекты поверхностного натяжения считаются малыми и не принимаются во внимание. Однако не приводится даже качественный анализ влияния на течение сил поверхностного натяжения на этих поверхностях раздела.

2. В разделе «Основные положения, выносимые на защиту» автор выделяет теоретические и аналитическую модели. Какая разница между ними? Аналитическая модель масляного тела в вихревой структуре не является теоретической?

3. Для выполнения поставленных задач экспериментального плана требуется не только провести эксперименты, но и создать специальные установки, разработать методику проведения экспериментов и методику обработки результатов экспериментов. Очевидно, что все это было сделано. При этом не освещен вопрос о соответствии геометрии использованных в экспериментах контейнеров моделируемым процессам, протекающим в океанской среде или в промышленных установках.



4. В диссертации следовало бы указать, как результаты, полученные в опытах на установках малого размера, позволяют описать процессы переноса вещества в вихревых и волновых течениях в Мировом океане. Как решается задача о пересчете на натурные океанские условия данных опытов? Кроме того, опыты проводились в объемах, ограниченных стенками контейнеров, Мировой океан таких границ не имеет. В какой мере экспериментальные условия, где все физические поля вблизи границ раздела изучаемых сред зависят от времени, а течения могут рассматриваться как установившиеся лишь в том или ином приближении, отвечают натурным? Также хотелось бы узнать мнение автора по вопросу взаимосвязи процессов переноса вещества и энергии в вихревых и волновых течениях в однокомпонентных и многокомпонентных средах, а также в стратифицированной морской среде.

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

### **Заключение**

Сочетая теоретические и экспериментальные методы, автор представила решения целого ряда важных научных и практических задач. Выполненные автором диссертации научные исследования фундаментальны для механики жидкостей и имеют перспективы практического использования. У автора диссертации имеется большое число (более сорока) публикаций, входящих в Перечень ВАК или представленных в международных базах данных Scopus и Web of Science.

Диссертационная работа Т.О. Чаплиной является законченной научно-квалификационной работой, в которой выполнены исследования, имеющие важное научное и прикладное значение, связанные с разработкой физико-математических моделей для моделирования океанических процессов и созданием на их основе технологий мониторинга текущего состояния Мирового океана и прогнозирования его развития. Проведенные Т.О. Чаплиной экспериментальные и теоретические исследования динамики и структуры многофазных вихревых и волновых течений и характера переноса в них примесей можно квалифицировать как научное достижение в области механики жидкостей, геофизике, экологии и, которое может быть использовано для моделирования процессов переноса вещества, а также с целью мониторинга и надежного прогнозирования распространения примесей в природных условиях (в стратифицированной гидросфере и атмосфере).

Результаты диссертационного исследования были доложены на многочисленных конференциях и научных семинарах. Имеются патенты на технологические решения, представленные в диссертации.

Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают содержание диссертации и характеризуют результаты проведенных исследований.

Уровень решаемых научных проблем соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора



физико-математических наук. Содержание диссертации соответствует специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

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

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

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

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы и удовлетворяет требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Чаплина Татьяна Олеговна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент

Заведующий отделом морских исследований Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, доктор технических наук

Носов Виктор Николаевич



*Носов Виктор Николаевич*  
*Зав. канцелярией ГЕОХИ РАН*