

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Очирова Артема Александровича
«Исследование закономерностей формирования
массопереноса, инициируемого волновыми движениями
жидкости», представленной на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Работа Очирова Артема Александровича посвящена теоретическому анализу процессов переноса вещества в течениях, вызванных распространением волн по свободной поверхности жидкости или по поверхности раздела несмешивающихся жидких сред. Наиболее известный классический пример такого рода течения – дрейф Стокса. Распространение волн по поверхности жидкости сопровождается довольно сложным движением её материальных частиц, приобретающих как циклические, так и дрейфовые компоненты скорости. В результате, формируется весьма непростая картина волнового массопереноса, расчет которого оказывается далеко нетривиальной задачей, особенно для многокомпонентных систем. Именно на анализе таких систем и сосредоточил своё внимание А.А. Очирова. Автор подробно рассмотрел задачу о расчете волнового массопереноса течением, формирующимся в системе двух идеальных жидкостей с тангенциальным скачком поля скоростей на возмущенной волновым движением поверхности раздела. Довольно интересные результаты получены по задаче, в которой одной из компонент системы является несжимаемая ньютоновская жидкость, а другой – плёнка поверхностно-активного вещества. Весьма подробно рассмотрена ситуация, когда плёнка поверхностно-активного вещества отделяет вязкую несжимаемую жидкость от движущегося над ней потока идеальной жидкости. Тема исследования представляется весьма актуальной для развития представлений о волновом массопереносе в идеальных и вязких жидкостях. Результаты исследования могут быть применены в приложениях, связанных с мониторингом и разработкой методов управления распространением загрязнений и различного рода присадок как на поверхности достаточно протяженных водоёмов, так и на границе раздела их внутренних слоёв. Итоги работы имеют важное значение для правильного понимания закономерностей процессов волнового массопереноса в мировом океане.

Краткий анализ содержания работы

Диссертационная работа А.А. Очирова изложена на 142 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав и заключения. Список цитируемой литературы содержит 227 наименований. Работа содержит 25 рисунков.

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируется цель, научная новизна и практическая значимость диссертации, приводятся основные результаты, информация о личном вкладе автора, и положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приводится ретроспективный обзор научной литературы по исследуемой тематике.

Вторая глава посвящена модификации (мотивированной обобщением задачи о расчете дрейфа Стокса) процедуры преобразования поля скоростей Эйлера к переменным Лагранжа в проблеме аналитического асимптотического расчета скорости индивидуальных жидких частиц и скорости среднего массопереноса для течения, возникающего в результате распространения периодической волны по поверхности раздела несмешивающихся жидкостей. Свои расчеты автор выполнил аналитически во втором приближении по амплитуде волны. В работе определен необходимый для получения правильного результата порядок вычислений, учитывающий многослойный характер строения системы и наличие тангенциального скачка поля скоростей на возмущенной волновым движением границе раздела слоев. Основные положения развитой автором методики подробно разобраны на несложном, но показательном примере – аналитическом расчете течения двухслойной системы идеальных жидкостей с тангенциальным разрывом поля скоростей вдоль возмущенной волновым движением поверхности раздела. Для этой системы А.А. Очиров с помощью развитой им методики построил аналитические выражения, описывающие скорости средних дрейфовых движений и траектории жидких частиц в обеих средах. Развитый автором подход позволил обнаружить новое интересное свойство течения с тангенциальным разрывом поля скоростей. Выяснилось, что в двухслойной системе с периодическим волновым возмущением на поверхности раздела формируются приграничные дрейфовые течения, осуществляющие приповерхностный массоперенос и направленные таким образом, чтобы уменьшить величину тангенциального скачка скорости, стремящегося инициировать неустойчивость тангенциального разрыва.

В третьей главе рассмотрены примеры анализа различных течений с помощью методики, развитой во второй главе. Рассмотрено влияние на среднее дрейфовое течение и движение индивидуальных жидких частиц амплитудной модуляции волнового возмущения свободной поверхности идеальной жидкости; проанализировано совокупное влияние тангенциального разрыва скоростей и амплитудной модуляции на характер дрейфа и траектории движения материальных частиц; изучено влияние поверхностного электрического заряда и совместное действие всех перечисленных факторов. Показано, что амплитудная модуляция заметно уменьшает дрейфовые эффекты, а регулировка параметров, изменяющих частоту волнового движения, позволяет управлять скоростью среднего дрейфа: при увеличении частоты скорость среднего дрейфа растет, а при уменьшении - снижается.

В четвертой главе исследовано влияние, оказываемое упругой нерастворимой пленкой поверхностно-активного вещества (ПАВ) на скорость дрейфового движения в несжимаемой ньютоновской жидкости конечной вязкости, по поверхности которой распространяется периодическая волна. Во втором приближении по амплитуде волны получены выражения для скорости дрейфа, состоящей из двух компонент – преобладающей классическому дрейфу Стокса и компоненты, связанной с наличием тангенциальных упругих натяжений. Исследовано влияние упругой пленки ПАВ на характер движения индивидуальных частиц жидкости. Проанализированы закономерности перераспределения вещества пленки вдоль поверхности жидкости при распространении по этой поверхности капиллярно-гравитационной волны. Проведено исследование влияния скорости движения идеальной сплошной среды над поверхностью вязкой жидкости, покрытой пленкой ПАВ, на характер гашения капиллярно-гравитационных волн и на закономерности перераспределения вещества пленки в условиях распространения волн по поверхности раздела сред.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты диссертационной работы, полученные соискателем лично и обладающие новизной

– Результаты модификации процедуры перехода от описания Эйлера к переменным Лагранжа в задачах с тангенциальным скачком поля скоростей на поверхности раздела идеальных жидкостей. Для расчета массоперноса в слоях идеальной жидкости,

прилегающих друг к другу по поверхности раздела, возмущенной волновым движением, необходимо применять специальную методику, предложенную А.А. Очировым. В своей основе метод использует связь условий применимости некоторых известных приближенных (верных во втором приближении по амплитуде волны) соотношений с надлежащим выбором системы координат. При расчете скорости среднего дрейфа, вызванного распространением волн, важно учитывать, что общепринятая приближенная формула, верная во втором приближении по амплитуде волны, корректно работает только в системе координат, движущуюся со скоростью среднего эйлера течения. Для расчета же траекторий движения индивидуальных жидких частиц перед применением соответствующих общепринятых приближенных формул необходимо переходить в систему координат, движущуюся со скоростью среднего лагранжевого течения, определяемого векторной суммой скорости среднего эйлера течения и предварительно рассчитанной скорости среднего дрейфа.

– Обнаружено новое свойство течения с тангенциальным разрывом поля скоростей: в жидкостях, контактирующих по поверхности, возмущенной волновым движением, возникают дрейфовые течения, уменьшающие скорость из относительного смещения.

– Результаты расчета влияния поверхностного электрического заряда, амплитудной модуляции и тангенциального разрыва скоростей на величину дрейфа и на характер траекторий движения индивидуальных частиц жидкости.

– Результаты расчета влияния пленки ПАВ на скорость дрейфовых движений в вязкой жидкости и на характер траекторий движения индивидуальных жидких частиц.

– Предложена модель перераспределения вещества пленки вдоль возмущенной волновым движением поверхности вязкой жидкости, в том числе с учетом движущейся над ней идеальной жидкости. Исследовано влияние скорости относительного движения сред на характер гашения капиллярно-гравитационных волн упругой пленкой ПАВ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выносимых на защиту

Развиваемые в работе подходы к описанию движения жидкостей являются общепринятыми и не выходят за рамки классической механики сплошных сред. Полученные соотношения непротиворечивы и в предельных переходах сводятся к известным

выражениям, полученным другими авторами. Материалы работы прошли апробацию на профильных семинарах и докладывались на конференциях различного уровня. Все это может свидетельствовать о высокой степени обоснованности и достоверности результатов и выводов, полученных в диссертации.

Замечания по диссертации

К тексту диссертации имеется ряд замечаний

1. В обзорной главе величина, обозначаемая символом a в некоторых случаях обозначает амплитуду волнового движения, а в некоторых – лагранжеву координату. В то же время в последующих главах амплитуда обозначается символом ζ . Такого рода переобозначения величин затрудняют чтение работы.

2. Рисунки с изображением траекторий движения индивидуальных жидких частиц в главе 2 построены в размерных переменных, тогда как все остальные рисунки работы – в безразмерных. Для сохранения логики изложения логичнее было бы придерживаться единообразия.

3. В задачах, связанных с расчетом перераспределения поверхностно-активного вещества по поверхности жидкости не учтена растворимость вещества.

Указанные замечания имеют рекомендательный характер и не снижают научной ценности работы и общего положительного впечатления в целом.

Заключение

Представленная к защите диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне. Полученные результаты обладают новизной, представляют научный интерес и соответствуют паспорту специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Результаты работы прошли апробацию и в том числе были опубликованы в 9-и изданиях, входящих в перечень ВАК и/или в базы цитирования WoS, Scopus. Содержание автореферата соответствует диссертации, правильно и полно отражает основные результаты исследования.

Считаю, что диссертация «Исследование закономерностей формирования массопереноса, инициируемого волновыми движениями жидкости» соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук, а ее автор Очиров Артем Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».



Булатов Виталий Васильевич,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории механики сложных жидкостей
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН
119526 Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп.1
тел. 8(495)4343238,
e-mail: internalwave@mail.ru

Подпись д.ф.-м.н., профессора В.В.Булатова подтверждаю:

Ученый секретарь ФГБУН ИГиМех РАН,
к. ф.-м.н.



М.А. Котов