

**«Институт механики сплошных сред  
Уральского отделения  
Российской академии наук»**  
- филиал Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Пермского  
федерального исследовательского центра  
Уральского отделения Российской академии наук  
**(ИМСС УрО РАН)**

614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1.  
Телефон, факс (3422) 37-84-61, (3422) 37-84-87  
E-mail: [mvp@icmm.ru](mailto:mvp@icmm.ru)  
ОКПО 15727771, ОГРН 1025900517378,  
ИНН/КПП 5902292103/590243001

№ \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Директор «Института механики сплошных  
сред Уральского отделения Российской  
академии наук» – филиала Федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки Пермского федерального  
исследовательского центра Уральского  
отделения Российской академии наук  
академик РАН



В. П. Матвеевко

2020 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

«Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук»  
– филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского  
федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии  
наук

о диссертационной работе Очирова Артема Александровича

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

#### **Актуальность темы диссертации.**

Волновой массоперенос в жидкости встречается в разнообразных метеорологических геофизических, биофизических, технических и академических приложениях. В диссертации обобщается методика расчета скорости дрейфа и траекторий движения индивидуальных частиц жидкости на случай многокомпонентных систем, участвующих в сдвиговом течении. Наличие аналитической процедуры расчета позволит тестировать численные методы и получить общее представление о характерных особенностях течения. Развитие методов мониторинга поверхностных загрязнений тесно связано с построением аналитической теории распределения поверхностно-активных веществ вдоль поверхности жидкости. В диссертации предложена модель, описывающая перераспределение поверхностно-активных веществ и их дрейф вдоль поверхности жидкости конечной вязкости. Это делает диссертационное исследование актуальным и отвечающим современным запросам научных исследований в этой области.

**Научная и практическая значимость** диссертации состоит в том, что полученные результаты формируют теоретическую основу для дальнейшего развития представлений о

волновом массопереносе, в том числе в присутствии поверхностно-активных веществ. Полученные результаты и предложенная модель по перераспределению поверхностно-активного вещества вдоль поверхности жидкости может быть использована для тестирования сложных численных моделей мониторинга поверхностных загрязнений мирового океана, а также для получения общефизических представлений о характере массопереноса и движения индивидуальных жидких частиц, составляющих жидкость.

### **Общая характеристика работы**

Объем диссертации составляет 142 страницы, включая 25 рисунков. Список литературы содержит 227 наименований. Структурно диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения.

*Во введении* отражена актуальность исследования, сформулирована цель работы, поставлены задачи исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту и кратко отражена структура диссертации.

Глобальная структура содержания работы следующая: первая глава представляет из себя литературный обзор; вторая и третья главы посвящены задаче расчета скорости дрейфовых движений и расчета траекторий движения индивидуальных жидких частиц в модели идеальной жидкости; четвертая глава посвящена вопросу массопереноса и перераспределения поверхностно-активного вещества вдоль поверхности вязкой ньютоновской жидкости.

*В первой главе* подробно обсуждается ретроспективное развитие представлений и подходов к решению задач, связанных с волновым массопереносом с учётом неустойчивости поверхности жидкости по отношению к тангенциальному разрыву скоростей, к избытку поверхностного электрического заряда и с учётом влияния упругих и неупругих плёнок, распределенных вдоль поверхности жидкости. Приведен литературный обзор работ по исследованию траекторий движения индивидуальных жидких частичек, формирующих сплошную среду.

*Вторая глава* посвящена модификации и развитию методики расчета скорости дрейфовых движений и траекторий движения индивидуальных частиц жидкости на примере модельной задачи в системе двух идеальных жидкостей, испытывающих тангенциальный разрыв скорости на границе раздела, возмущенной простейшей бегущей синусоидальной волной.

*В третьей главе* на различных примерах рассмотрено применение методики, модифицированной и предложенной в предыдущей главе. Рассматривается по отдельности влияние на скорости дрейфа и траектории движения индивидуальных жидких частиц амплитудной модуляции, поверхностного электрического заряда в однокомпонентных и в двухкомпонентных системах. Во всех случаях получены аналитические выражения для скорости дрейфа и описаны траектории движения индивидуальных частиц жидкости.

*В четвертой главе* исследуются дрейфовые движения в вязкой ньютоновской жидкости, покрытой плёнкой поверхностно-активного вещества. Получены аналитические выражения для скорости дрейфа. Выделены компоненты дрейфа, ведущие себя аналогично классическому дрейфу Стокса и переходящие в него в пределе малой вязкости. Выделена компонента скорости дрейфа, связанная с касательными упругими натяжениями и сложным образом зависящая от глубины и времени (быстрее затухающая с глубиной и медленнее со временем по сравнению с классическим дрейфом Стокса).

Оценено поведение жидких частиц под плёнкой поверхностно-активного вещества. Рассмотрен характер перераспределения вещества упругой плёнки вдоль поверхности жидкости, связанный с волновым возмущением поверхности жидкости. Рассмотрено влияние докритической (в смысле реализации неустойчивости по отношению к тангенциальному разрыву скоростей) скорости на характер перераспределения поверхностно-активного вещества и на особенности гашения капиллярно-гравитационных волн плёнкой поверхностно-активного вещества.

**В заключении** приведены основные результаты работы.

Все полученные результаты обладают научной новизной и значимостью.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием стандартных аналитических методов математической физики и классических моделей гидродинамики идеальной и вязкой жидкостей, сравнением полученных результатов с теоретическими и экспериментальными данными других авторов, в том числе выполнением предельных переходов к известным моделям.

### **Публикации**

Результаты работы изложены в 45 печатных и электронных изданиях из них 25 – в сборниках трудов конференций различного уровня, 3 – в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 1 – в издании, индексируемом ZbMath и 6 – изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

### **Соответствие автореферата диссертации.**

Основные разделы работы, результаты и выводы представлены в автореферате. Автореферат соответствует содержанию диссертации и удовлетворяет требованиям ВАК.

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

Результаты работы могут быть рекомендованы к ознакомлению в научных подразделениях университетов (физический факультет ЯрГУ, физический и механико-математический факультеты МГУ, Пермский государственный университет и др.), а также в академических институтах РАН (Институт механики сплошных сред УрО РАН, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, Институт океанологии им. П.П. Ширшова и др.).

### **Замечания по диссертационной работе**

В целом диссертационная работа Очирова А.А. представляет собой законченный труд, хотя и не лишена некоторых недостатков.

1. В записи уравнения неразрывности для поверхностного распределения упругой плёнки ПАВ (выражение 4.5) отсутствуют слагаемые, связанные с поверхностной диффузией вещества плёнки. При этом не приведены численные оценки коэффициента диффузии в доказательство малости этих слагаемых по сравнению с перераспределением вещества плёнки ПАВ, вызванной изменением кривизны поверхности.
2. Задача о перераспределении ПАВ решена в линейной постановке, в то время как волны на поверхности больших водоемов явно нелинейны. В работе не сделано попыток оценить влияние вклада нелинейных слагаемых на характер перераспределения ПАВ вдоль поверхности жидкости.
3. В работе представлен анализ поведения частиц жидкости и перераспределения пленки ПАВ в случае распространения бегущих волн вдоль поверхности жидкости. Отсутствует рассмотрение случая стоячих волн, тогда как в некоторых экспериментах

удобнее реализовать именно стоячие волны и подобное рассмотрение было бы интересно исследователям.

4. Отсутствует сравнение полученных результатов с результатами экспериментальных исследований. Между тем, проблема взаимодействия гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) с пленкой ПАВ на поверхности раздела активно исследуется на стыке гидродинамики и физической химии, где анализ характеристик ГКВ используется для исследования реологических характеристик слоя ПАВ. В частности, вопросы резонансного взаимодействия гравитационно-капиллярной и дилатационной волн (в диссертации волна Марангони) достаточно полно исследованы экспериментально в докторской диссертации Носкова Б.А. «Физико-химия капиллярных волн». Там же можно найти великолепный обзор литературы по указанной тематике. Распределение ПАВ на поверхности при распространении ГКВ также активно исследуется в последние годы (например, Strickland S. L., Shearer M., Daniels K. E. Spatiotemporal measurement of surfactant distribution on gravity–capillary waves //Journal of Fluid Mechanics. – 2015. – V. 777. – P. 523-543) благодаря развитию экспериментальных методик.
5. В диссертации все исследованные ситуации рассмотрены в двумерной постановке. Между тем известно (см., например, Punzmann H. et al. Generation and reversal of surface flows by propagating waves //Nature Physics. – 2014. – V. 10. – №. 9. – P. 658-663), что осредненное дрейфовое течение на поверхности, даже в случае двумерной волны, обычно оказывается трехмерным.
6. В работе пренебрегается реологическими характеристиками слоя ПАВ: двумерными дилатационной и сдвиговой вязкостями. Для такого приближения необходимо сделать оценки. Например, оценить величину числа Буссинеска, которое показывает относительный вклад поверхностной и объемной вязкостей. Данный безразмерный параметр возникает при описании слоя ПАВ в рамках приближения Буссинеска-Скривена (см., например, Manikantan H., Squires T. M. Surfactant dynamics: hidden variables controlling fluid flows //Journal of Fluid Mechanics. – 2020. – T. 892). Учитывая малый характерный размер задачи, длина волны, величина данного параметра может оказаться большой (см., например, Lyubimov D.V., Kononov V.V., Lyubimova T.P., Egry I. Small amplitude shape oscillations of a spherical liquid drop with surface viscosity. Journal of Fluid Mechanics. – 2011. – V. 677. P. 204-217). В таком случае основное влияние на течения в приповерхностном слое будет оказывать поверхностная реология, и это будет необходимо учесть в модели. Данный комментарий, как и предыдущий, необходимо рассматривать, скорее, не как замечание, а как рекомендацию для будущих исследований автора.
7. В работе присутствуют стилистические неточности и опечатки.

Приведенные замечания не снижают общего положительного впечатления о работе и могут рассматриваться в качестве рекомендаций к дальнейшему развитию исследования.

### **Заключение**

Диссертация Очирова Артема Александровича на тему «Исследование закономерностей формирования массопереноса, инициируемого волновыми движениями жидкости» является законченной научно-исследовательской работой.

Содержание диссертации соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук. Очиров Артем Александрович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05. – «Механика жидкости, газа и плазмы».



Диссертационная работа рассмотрена на научном семинаре «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, протокол заседания № 9/20 от 20.09.2020 г. Отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого совета ПФИЦ УрО РАН № 4/2020 от 23.09.2020г.

Отзыв составлен:

Заведующий лабораторией  
Вычислительной гидродинамики ИМСС УрО РАН,  
Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор физико-математических наук, профессор  
Любимова Татьяна Петровна

 Т.П. Любимова

Заведующий лабораторией  
Гидродинамической устойчивости ИМСС УрО РАН,  
доктор физико-математических наук,  
Мизев Алексей Иванович

 / А.И. Мизев

Сведения о ведущей организации:  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Пермский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук  
(ПФИЦ УрО РАН)

Почтовый адрес:  
614013, Пермь, ул. Академика Королева, 1  
тел.: +7 (342) 237 84 61;  
e-mail: [mvp@icmm.ru](mailto:mvp@icmm.ru)  
Веб-сайт: [http:// www.permsc.ru](http://www.permsc.ru)

