

*На правах рукописи*



ХАЗАНОВ Григорий Ефимович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ  
ГРАВИТАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН В ОКЕАНЕ  
В ПРИСУТСТВИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛЕНОК  
И ФРАГМЕНТИРОВАННОГО ЛЬДА**

1.6.17 – океанология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).

Научный руководитель: Ермаков Станислав Александрович, доктор физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: И. А. Репина, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, лаборатория взаимодействия атмосферы и океана;

В. А. Дулов, доктор физико-математических наук, Лаборатория прикладной физики моря, Морского гидрофизического института РАН.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии имени П. П. Ширшова Российской академии наук (г. Москва)

Защита диссертации состоится 18 декабря 2023 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 24.1.238.03 при ИПФ РАН (603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИПФ РАН и на сайте [ipfran.ru](http://ipfran.ru).

Автореферат разослан «14» ноября 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



А. И. Малеханов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Анализ характеристик волн на поверхности воды, покрытой пленками органических поверхностно-активных веществ (ПАВ), масла/нефтепродуктов, очень важен в контексте проблемы загрязнения океана и дистанционного зондирования [Alpers and Huehnerfuss, 1989; Scott and Thomas, 1999; Brown and Fingas, 2003].

Разливы нефти, так же как и биогенные пленки, проявляются на спутниковых оптических, инфракрасных (ИК) или пассивных микроволновых снимках в виде цветных, темных или ярких областей, в зависимости от геометрии, условий освещения, толщины пленки, длины волны электромагнитного излучения. К числу одних из наиболее эффективных инструментов для обнаружения/мониторинга пленок на морской поверхности относятся спутниковые микроволновые радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), поскольку, в отличие от оптических и ИК-систем, они могут использоваться круглосуточно и при самых разных погодных условиях. Эффективность РСА определяется, в частности, тем, что обратное рассеяние в Ku – L-диапазонах микроволн в основном обусловлено короткими ветровыми волнами сантиметрового-дециметрового масштабов, влияние пленок на которые оказывается наиболее сильным [Cini et al., 1983; Ermakov et al., 1986; Alpers and Huehnerfuss, 1989; Gade et al., 1998b; Hansen et al., 2016; Ermakov et al., 2018]. Это влияние связано с эффектом подавления коротких ветровых волн поверхностными пленками, которое проявляется в уменьшении интенсивности радиолокационного сигнала и которое можно характеризовать относительной интенсивностью обратного рассеяния – контрастом. Последний существенно зависит от характеристик пленки, от длины волны зондирующего микроволнового излучения, скорости и направления ветра. Такие зависимости могут быть использованы для получения информации о характеристиках пленки, особенно при использовании радиолокаторов, работающих одновременно в нескольких диапазонах длин волн [см. Fiscella et al., 1985; Gade et al., 1998a; Ermakov et al., 2018].

Затухание коротких гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) подробно исследовалось для случая очень тонких, мономолекулярных пленок ПАВ, которые образуются жирными кислотами, спиртами, эфирами. В то же время, для разливов нефти и нефтепродуктов характерно образование достаточно толстых пленок (толщины до единиц миллиметров и более). Затухание волн в присутствии таких пленок, так же как и сами их характеристики, исследовано пока недостаточно. Поэтому исследование затухания ГКВ в присутствии пленок конечной толщины является важной частью проблемы дистанционной диагностики морских пленок.

Особенностью пленок, толщины которых составляют десятки – сотни характерных длин молекул ПАВ, является неоднородность по толщине, что, в

частности, характерно для пленок нефтепродуктов. Толщины при этом разнятся довольно сильно, от десятков ангстрем до единиц миллиметров, что может оказать существенное влияние на характер затухания ГКВ. Неоднородности морских пленок характеризуются широким диапазоном масштабов, что подтверждается многочисленными исследованиями по измерениям толщин нефтяных slickов в местах крупных разливов [Cheemalapati and Forth, 2017]. Таким образом, интерес представляет характер затухания волн в пленках конечной толщины, а также в пленках с существенной неоднородностью. При этом целесообразно было бы характеризовать пленку в области элемента разрешения лоатора некоторой эффективной толщиной и упругостью и в дальнейшем рассматривать пленку как однородную с соответствующими эффективными параметрами. Это позволит упростить построение моделей рассеяния микроволнового излучения, необходимых для описания затухания ГКВ сантиметрового диапазона в реальных условиях, что весьма важно для интерпретации данных дистанционного зондирования.

Важной задачей океанологии является также анализ сигнала обратного радиолокационного рассеяния в области, покрытой несплоченным льдом. Как известно, морской лед на начальном этапе своего формирования в прикромочной зоне может существовать в разных формах, включая ледяное сало, снежуру, блинчатый лед и другие [Massom, Stammerjohn, 2010; Johannessen, Hibler, 1983]. Перечисленные выше начальные формы льда (НФЛ) приводят к затуханию волн на морской поверхности и, соответственно, влияют на интенсивность микроволнового рассеяния на морской поверхности; в результате идентификация участков поверхности, покрытой НФЛ и находящейся в области между сплоченным льдом и открытой водой, может быть довольно затруднительной. Другой аспект проблемы затухания волн в присутствии НФЛ заключается в том, что области сильного затухания волн на радиолокационных панорамах океана после прохождения зон, покрытых НФЛ, могут быть ошибочно интерпретированы как, например, нефтяные загрязнения. Механизмы затухания поверхностных волн в присутствии НФЛ пока изучены недостаточно, включая, в частности, связь эффективной вязкости ледяного сала с объемной концентрацией частиц льда, а также зависимость затухания от размеров льдин, особенно при сопоставимости этих размеров с длиной поверхностной волны.

Основными механизмами затухания волн при их взаимодействии со льдом принято считать рассеяние, а также вязкую диссипацию волн. Для описания затухания волн, взаимодействующей с ледяной структурой, используются главным образом две группы моделей – учитывающие рассеяние волн отдельными льдинами [Masson, LeBlonde, 1989; Kohout and Meylan, 2008] и основанные на описании ледяного покрова как вязкой жидкости или вязкоупругого материала [Weber, 1987; Keller, 1998; Wang, Shen, 2010b]. Сравнение влияния разных механизмов на величину затухания остается предметом исследований [Williams et al., 2013], и этот вопрос до сих пор не изучен до кон-

ца. В частности, недостаточно изучен вопрос о затухании волн в условиях, когда размеры льдин сравнимы с длинами поверхностных волн. Анализ, проведенный в данной работе, даст лучшее понимание физических механизмов затухания волн в присутствии льда и будет способствовать дальнейшему развитию физических моделей затухания волн в океане.

### **Цели и задачи диссертации**

Основными целями данной работы являются: исследование затухания гравитационно-капиллярных волн на поверхности воды в присутствии вязкоупругих пленок конечной толщины, как однородных, так и неоднородных, разработка физической модели затухания гравитационно-капиллярных волн в присутствии морских пленок, а также исследование затухания гравитационных волн на поверхности воды, в присутствии фрагментированного льда. Перечисленные задачи важны для решения проблемы дистанционного зондирования океана.

Достижение этих целей потребовало решения следующих задач:

1) Развитие теории затухания гравитационно-капиллярных волн при наличии пленок конечной толщины, основанной на приближенном описании вихревой и потенциальной компонент ГКВ, а также волн Марангони на поверхности воды, покрытой пленкой.

2) Получение аналитических формул для коэффициента затухания ГКВ на поверхности воды, покрытой слоем вязкой жидкости конечной толщины с упругими границами.

3) Лабораторное моделирование формирования сильно неоднородных пленок на воде, экспериментальное исследование и развитие физической модели затухания волн на сильно-неоднородных пленках.

4) Лабораторное и натурное моделирование затухания гравитационных волн в присутствии имитаторов льда.

5) Разработка методики и численное моделирование затухания волн на воде в присутствии имитаторов льда с использованием пакета «OpenFOAM» для численного моделирования задач механики сплошных сред.

### **Научная новизна**

Исследования, описанные в настоящей диссертационной работе, новы и оригинальны, включая следующие результаты:

1. Построена приближенная теория затухания гравитационно-капиллярных волн при наличии пленок конечной толщины на поверхности воды. Впервые показано, что вихревые компоненты ГКВ могут быть формально описаны как «вынужденные» продольные волны (волны Марангони), возбуждаемые потенциальной компонентой ГКВ. Для пленок конечной толщины обнаружен эффект двойного резонанса – двухпиковая зависимость коэффициента затухания ГКВ от волнового числа.

2. Впервые аналитически получено, что зависимость коэффициента затухания ГКВ от толщины пленки носит резонансный характер и характеризуется значительным максимумом при толщинах пленки, сопоставимых с масштабом вязкого пограничного слоя в пленке. Показано, что зависимость коэффициента затухания от волнового числа ГКВ для толстой пленки с различной упругостью границ раздела заметно шире, чем для тонкой пленки. В лабораторных условиях промоделированы сильно неоднородные по толщине пленки чистых ПАВ и нефти, характеризующиеся, в частности, наличием толстых «линз», соседствующих с областями тонкой пленки. Впервые предложено физическое объяснение эффекта возрастания коэффициента затухания ГКВ с ростом относительной площади «линз» в рамках модели «линз-стенок», заключающееся в уменьшении площади поверхности тонкой пленки и соответствующем увеличении влияния стенок – границ линз. Введена эффективная упругость двухфазной пленки – тонкого слоя с линзовой фазой.

3. В ходе натуральных и лабораторных экспериментов по изучению затухания волн на воде в присутствии имитаторов фрагментированного льда впервые обнаружено наличие локального максимума коэффициента затухания волн с длинами порядка размеров «льдин».

4. В результате численного моделирования взаимодействия поверхностной волны с льдинами получено удовлетворительное количественное описание результатов экспериментов и впервые дана физическая интерпретация эффекта резонансного затухания волн на фрагментированном льду.

### **Научная и практическая значимость результатов работы**

Результаты диссертационной работы углубляют понимание механизмов затухания гравитационно-капиллярных волн на поверхности воды в присутствии пленок ПАВ конечной толщины, неоднородных по толщине пленок и фрагментированного льда.

Полученные аналитические формулы для коэффициента затухания ГКВ на поверхности воды, покрытой слоем вязкой жидкости конечной толщины с упругими границами, могут иметь значение для разработки методов дистанционного зондирования для обнаружения разливов нефти и различения толстых и тонких пленок, в том числе биогенных. Коэффициент затухания для толстых пленок характеризуется более широким профилем зависимости от волнового числа, чем для случая тонкой пленки. Эта функция потенциально может быть использована для задач различения пленок с различными значениями толщины, например, при измерении сигнала обратного рассеяния микроволн в нефтяных разливах.

Полученные в ходе экспериментального и численного моделирования зависимости затухания гравитационных волн от отношения длины волны к размеру льдины важны для понимания физических механизмов затухания волн, а также для корректной интерпретации спутниковых изображений морской поверхности, покрытой несплоченным льдом.

## **Достоверность полученных результатов**

Высокая степень достоверности результатов проведенных исследований обеспечивается использованием надёжных физических моделей и применением теоретических методов, имеющих строгое математическое обоснование. Результаты тщательно сопоставлялись с лабораторными экспериментами и численным моделированием, а также с результатами, полученными ранее другими авторами. Результаты работы успешно представлены в передовых физических журналах и докладывались на всероссийских и международных конференциях.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Затухание гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) на поверхности воды в присутствии вязко-упругой пленки конечной толщины определяется диссипацией в вязких погранслоях вблизи границ вода – пленка и пленка – воздух. При пространственном разделении этих погранслоев в случае толстой пленки коэффициент затухания ГКВ как функция волнового числа, при определенных параметрах упругости на границах раздела, имеет два максимума (эффект двойного резонанса).

2. Коэффициент затухания ГКВ немонотонно меняется с толщиной и имеет локальный максимум, когда толщина пленки сравнима с толщиной вязкого погранслоя в пленке. Затухание ГКВ на сильно неоднородных по толщине пленках (при наличии тонкой пленки и линз макроскопической толщины) увеличивается с ростом относительной площади линзовой фазы. Эффект объясняется влиянием границ линз как дополнительных стенок, уменьшающих эффективную площадь тонкой пленки, в которой затухание существенно меньше, чем в толстой.

3. Коэффициент затухания гравитационных волн на поверхности воды в присутствии фрагментированного льда характеризуется наличием локального максимума при длинах волн сопоставимых с размером льдин.

4. Резонансный характер затухания волн на воде в присутствии фрагментированного льда связан с возрастанием присоединенной массы льдин, если частоты волн близки к частотам собственных вертикальных и вращательных колебаний льдин.

## **Апробация результатов работы**

Диссертационная работа выполнена в Институте прикладной физики РАН. Результаты диссертации были использованы в ходе исследовательских работ в рамках грантов РФФИ, РФФИ, проектов в рамках федеральных целевых программ Минобрнауки.

Материалы диссертации были представлены на семинарах ИПФ РАН, научных конференциях по радиофизике в ННГУ (2020, 2023, Нижний Новгород), международных конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» ИКИ РАН (2021, 2022, Москва), конфе-

ренции «Нелинейные волны» (2022, Нижний Новгород), международной конференции «Волны и вихри в сложных средах» (2022, Москва), всероссийской школе-семинаре «Волновые явления: физика и применения» (2023, Москва), международной конференции «SPIE Remote Sensing conference» (2021), международной конференции «The International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)» (2022).

### **Личный вклад автора**

Все результаты диссертации получены при непосредственном активном участии автора, в том числе, в части развития аналитической теории затухания ГКВ, анализа результатов и обработки данных. Автору принадлежат результаты численного моделирования задачи взаимодействия гравитационных волн с имитаторами льда. Проведение лабораторного и натурного модельных экспериментов, а также обработка результатов выполнены автором совместно в составе коллектива: Доброхотов В. А., Доброхотова Д. В., Лещев Г. В.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка основных работ автора по теме диссертации. Общий объём диссертации составляет 108 страниц, включая 56 иллюстраций и 2 таблицы. Список литературы включает 107 источников.

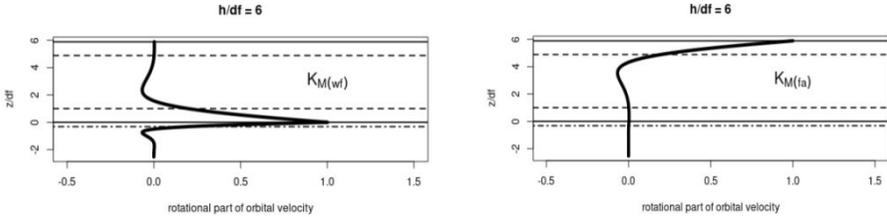
## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются её цели и задачи, кратко излагается содержание диссертации.

В **Главе 1** приводится теория затухания ГКВ на поверхности воды в присутствии вязко-упругой пленки конечной толщины, а также, описан эффект двойного резонанса. В разделе 1.1 приведен обзор литературы, посвященной анализу затухания ГКВ на поверхности воды. В разделе 1.2 описаны основные уравнения и граничные условия для волновых движений малой амплитуды в двухслойной вязкой жидкости – пленке конечной толщины, плавающей на поверхности воды. В разделе 1.3 изучаются чисто вихревые волны в двухслойной вязкой жидкости – продольные волны (Марангони). Последние, в предельном случае очень тонкой пленки, описываются как одиночная мода Марангони, локализованная в воде непосредственно под пленкой. В случае достаточно толстой пленки волна Марангони состоит из двух мод – одна расположена под верхней границей пленки, другая – в пограничных слоях, образованных ниже и выше границы раздела вода – пленка.

В разделе 1.4 дан анализ волновых движений в двухслойной жидкости и получено дисперсионное соотношение для гравитационно-капиллярных и внутренних волн. Показано, что вихревая компонента ГКВ с достаточно высокой точностью может быть описана как решение уравнений для волн Ма-

рангони с внешней силой, определяемой потенциальной частью ГКВ. В разделе 1.5 приведены выражения для коэффициента затухания гравитационно-капиллярных волн. Показано, что в случае толстой пленки моды Марангони возбуждаются резонансным образом, если волновое число ГКВ близко к одному из волновых чисел мод Марангони. Показано, что затухание, определяемое в основном вихревой компонентой ГКВ, может иметь двухпиковый характер в зависимости от волнового числа. Приведены сравнения с численными результатами других авторов.

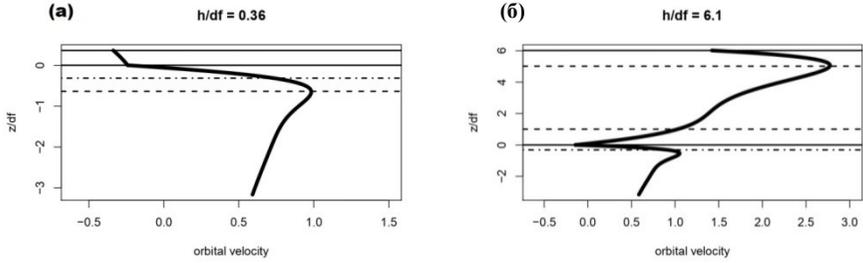


**Рис. 1.** Профили безразмерной скорости в продольных волнах (Марангони) в зависимости от безразмерной глубины для двух мод в толстой пленке,  $h \gg d_f$ , с  $k_{M(fa)}^2$  и  $k_{M(wf)}^2$ .  $\sigma_{wf} = 20$  мН/м,  $E_{wf} = 45$  мН/м,  $\sigma_{fa} = 30$  мН/м,  $E_{wf} = 12$  мН/м.

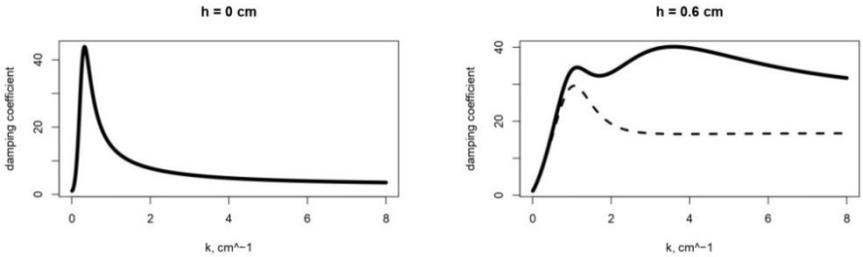
Затухание ГКВ в присутствии пленки с упругими границами определяется главным образом вихревой компонентой ГКВ, амплитуда которой может быть сопоставима с амплитудами потенциальной части. Это приводит к большим градиентам в пограничных слоях и, следовательно, к усиленному по сравнению со случаем чистой воды затуханию. На рис. 2 показаны вертикальные профили горизонтальной орбитальной скорости в ГКВ при различных значениях толщины пленки.

Примеры относительного коэффициента затухания ГКВ, нормированного на затухание волн на поверхности чистой воды, представлены на рис. 3, 4 как функции волнового числа. Можно видеть, что при определенных параметрах упругости, толщины и вязкости пленки возникает двойная резонансная зависимость коэффициента затухания ГКВ от волнового числа из-за резонанса с каждой из двух пространственно разделенных вынужденных мод ВМ. Зависимость коэффициента затухания от волнового числа ГКВ для толстой пленки с различной упругостью границ раздела заметно шире, чем для тонкой пленки. Это может быть использовано как признак толстой пленки с двумя упругими границами.

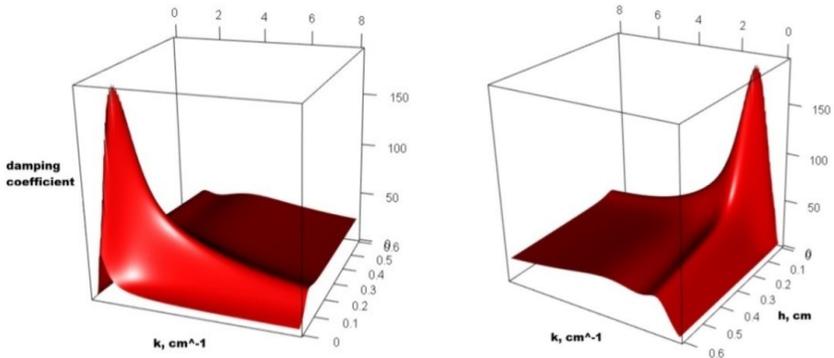
Коэффициент затухания, рассчитанный в соответствии с развитой теорией, показан на рис. 5. Можно заключить, что наша теория в целом согласуется с результатами [Jenkins and Jakobs, 1997].



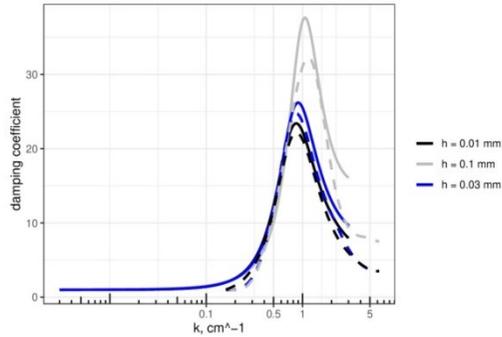
**Рис. 2.** Вертикальные профили горизонтальной орбитальной скорости в ГКВ при различных значениях толщины пленки  $h/d_f$  ( $k = 3$  рад/см, частота ГКВ 65 рад/с в (а), и около 63 рад/с для (б)).  $v_f = 10v_w$ ,  $\sigma_{wf} = 20$  мН/м,  $\sigma_{fa} = 30$  мН/м,  $E_{wf} = 45$  мН/м,  $E_{fa} = 12$  мН/м. Пунктирные и точка-пунктирные линии обозначают толщину пограничного слоя в пленке и в воде соответственно.



**Рис. 3.** Относительный коэффициент затухания ГКВ как функция волнового числа для различных толщин пленки. Сплошная линия  $E_{wf} = 65$  мН/м,  $E_{fa} = 15$  мН/м, пунктирная линия  $E_{wf} = 65$  мН/м,  $E_{fa} = 0$  мН/м.  $\sigma_{wf} = 20$  мН/м,  $\sigma_{fa} = 30$  мН/м,  $v_w = 0.01$  см<sup>2</sup>/с,  $v_f = 15v_w$ ,  $\rho_f = 0.85$  г/см<sup>3</sup>.



**Рис. 4.** Относительный коэффициент затухания (3-d):  $v_f = 15v_w$ ,  $\rho_f = 0.85$  г/см<sup>3</sup>,  $E_{wf} = 65$  мН/м,  $E_{fa} = 15$  мН/м (слева);  $E_{wf} = 65$  мН/м,  $E_{fa} = 0$  мН/м (справа).



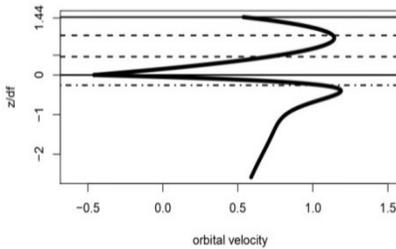
**Рис. 5.** Относительный коэффициент затухания как функция волнового числа.  $E_{fa} = E_{wf} = 15$  мН/м,  $\sigma_{wf} = 15$  мН/м,  $\sigma_{fa} = 25$  мН/м,  $\nu_w = 0.0085$  см<sup>2</sup>/с,  $\nu_f = 100\nu_w$ ,  $\rho_f = 0.85$  г/см<sup>3</sup>. Сплошные линии – наша теория, пунктирные линии – данные [Jenkins and Jakobs, 1997].

В [разделе 1.6](#) представлены выводы к главе 1. Получено, что вихревая компонента ГКВ может быть формально описана как вынужденная продольная волна (волна Марангони, ВМ), которая в основном определяет затухание ГКВ. Можно заключить, что для толстой пленки существуют две вынужденные моды ВМ, что при определенных значениях параметров упругости границ раздела приводит к возникновению двух максимумов коэффициента затухания ГКВ как функции волнового числа ГКВ из-за резонанса с каждой из вынужденных мод ВМ.

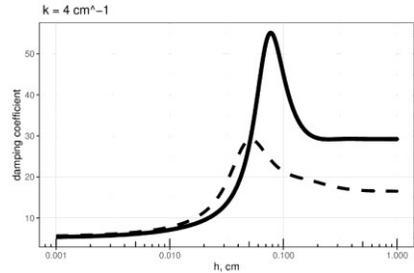
**Глава 2** посвящена теоретическому и лабораторному моделированию затухания ГКВ на воде с неоднородными по толщине пленками. В [разделе 2.1](#) приведено введение к главе 2, даны особенности пленок, толщины которых превышают толщины мономолекулярных пленок (25–30 Å). Описана актуальность задачи радиолокационного зондирования поверхности океана в присутствии пленок конечной толщины и неоднородных по толщине пленок. Приведены снимки морской поверхности, демонстрирующие существенную неоднородность нефтяных пятен и разливов. В [разделе 2.2](#) представлены теоретические расчеты коэффициента затухания как функции толщины пленки и сравнение с экспериментом. Показано, что зависимости коэффициента затухания ГКВ от толщины пленки немонотонны и характеризуются возникновением сильного локального максимума при значениях толщины от нескольких десятых долей миллиметра, примерно до 1 мм (рис. 7). Максимум достигается, когда толщина пленки примерно равна толщине пограничного слоя  $d_f$ , то есть когда погранслои практически соединяются друг с другом, или близки к этому, как показано на рис. 6.

Численные результаты [Sergiyevskaya et al., 2019] хорошо согласуются с нашими. Наша теория лучше описывает эксперимент, особенно если мы

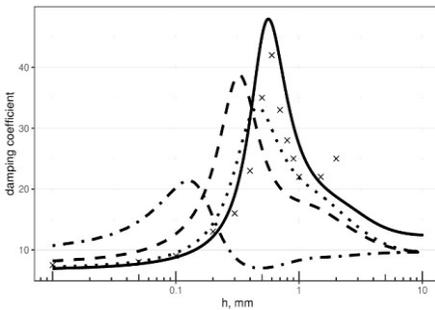
предполагаем ненулевую, хотя и довольно малую, упругость  $E_{fa}$  (черная сплошная линия на рис. 8).



**Рис. 6.** Вертикальные профили горизонтальной орбитальной скорости в ГКВ при  $h/d_f = 1.44$  ( $k = 3$  рад/см,  $v_f = 10v_w$ ,  $E_{wf} = 45$  мН/м,  $E_{fa} = 12$  мН/м). Пунктирные и штрих-пунктирные линии обозначают толщину пограничного слоя в пленке и в воде соответственно.



**Рис. 7.** Относительный коэффициент затухания ГКВ как функция толщины пленки для различных волновых чисел. Сплошная линия –  $E_{wf} = 30$  мН/м,  $E_{fa} = 10$  мН/м, пунктирная линия –  $E_{wf} = 30$  мН/м,  $E_{fa} = 0$  мН/м.  $v_f = 15v_w$ .



**Рис. 8.** Относительный коэффициент затухания как функция толщины пленки при  $E_{fa} = 0$  и различных значениях  $E_{wf}$ : 10 мН/м (точка-пунктир), 20 мН/м (пунктир), 35 мН/м (точки), и при  $E_{fa} = 5$  мН/м и  $E_{wf} = 35$  мН/м. Частота и волновое число ГКВ 10 Гц и 3 рад/см,  $v_f = 0.09$  см<sup>2</sup>/с,  $\rho_f = 0.85 \frac{г}{см^3}$ . Кресты – эксперимент с нефтяными пленками (см. Sergievskaya et al., 2019).

В разделе 2.3 представлено лабораторное моделирование неоднородных пленок, описана экспериментальная методика и особенности растекания нефтяной пленки по поверхности кюветы. Показано, что при нанесении на уже имеющуюся пленку определенного количества чистого ПАВ либо нефти, эти вещества не растекаются равномерно по всей поверхности, а формируют устойчивые островки конечной толщины – линзовую фазу.

В разделе 2.4 представлено экспериментальное исследование затухания ГКВ на сильно неоднородных пленках, описан метод параметрических возбуждаемых волн (МПВВ) – метод, в основе которого лежит параметрическое возбуждение ГКВ в кювете, расположенной на вибростенде. Регулируя амплитуду и частоту колебаний вибростенда, можно добиться параметрического возбуждения стоячих ГКВ. Условием начала возбуждения параметрических колебаний является равенство накачки и коэффициента затухания.

Важной особенностью использования МППВ для изучения затухания на неоднородных пленках является тот факт, что возбуждение происходит вначале в областях мономолекулярной (тонкой) пленки. На рис. 9, 10 можно видеть, что колебания присутствуют только в мономолекулярной области кюветы, в самой линзе олеиновой кислоты стоячих волн не наблюдается. Это соотносится с полученными ранее результатами: затухание в толстой пленке практически на порядок превышает затухание в тонкой.

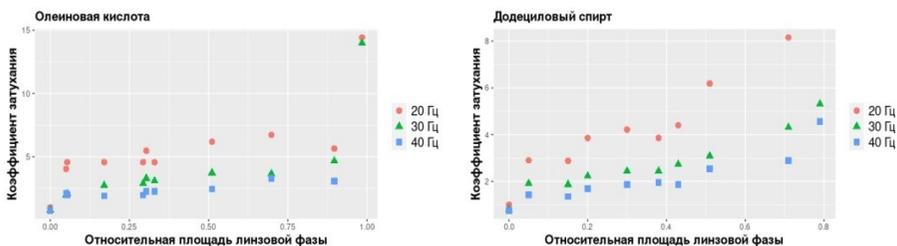


**Рис. 9.** Стоячие волны в кювете с водой в присутствии линзы олеиновой кислоты с размером чуть меньше ширины кюветы



**Рис. 10.** Стоячие волны в правой части кюветы в присутствии линзы олеиновой кислоты с размером, равным ширине кюветы

С помощью микропипетки был создан квазимономолекулярный слой. Затем, поверх него, вещество добавлялось порциями, формируя линзу, которая не растекалась по всей поверхности кюветы, а сохраняла свою форму и структуру. При добавлении вещества имеющийся островок линзовой фазы будет расширяться, оставаясь стабильным в смысле растекания по всей поверхности. График зависимостей коэффициента затухания от относительной площади линзовой фазы при разных частотах представлен на рис. 11. На обоих графиках все точки соответствуют генерации в тонкой фазе, то есть генерации в линзовой фазе в этот момент не было.

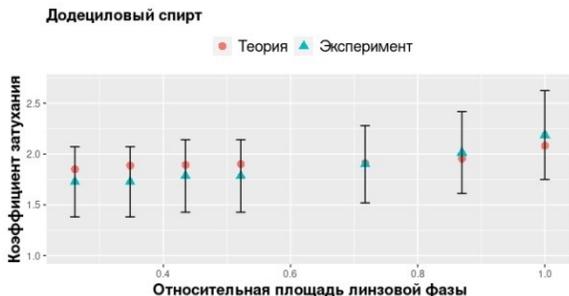


**Рис. 11.** Зависимость относительного коэффициента затухания ГКВ от относительной площади линзовой фазы олеиновой кислоты (слева) и додецилового спирта (справа) в кювете для различных частот генерации.

На стадии когда параметрическое возбуждение волн происходит только в тонкой фазе, можно говорить о линзовой фазе как об аналоге стенки, которая ограничивает распространение колебаний в кювете. И если размер линзовой фазы достигнет поперечного размера кюветы, генерация волн слева и справа от линзы будет возникать независимо друг от друга. Тем самым мы, по сути, разделим бассейн на два других, с новыми размерами (см. рис. 10).

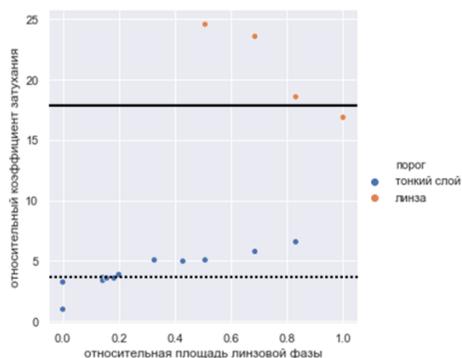
В разделе 2.5 описана простая физическая модель затухания на неоднородных пленках и дана физическая интерпретация роста затухания с ростом относительной площади линзовой фазы. Модель предполагает рассмотрение линзы с размерами ширины кюветы как стенку, а пространства слева и справа как новые кюветы. Для проверки справедливости такого приближения линза перемещалась вдоль кюветы, тем самым меняя размеры новых бассейнов слева и справа от нее. Значение измеряемого при этом коэффициента затухания в тонкой фазе сравнимо с теоретически ожидаемым, если считать, что линза является стенкой (рис. 12).

Расхождение теоретических и экспериментальных точек мало, что позволяет рассматривать линзовую фазу в качестве аналога стенки в рамках нашей модели. Это позволяет связать рост затухания для зависимости, описывающей генерацию при наличии тонкого слоя, с уменьшением размеров новых эффективных кювет, содержащих этот тонкий слой.



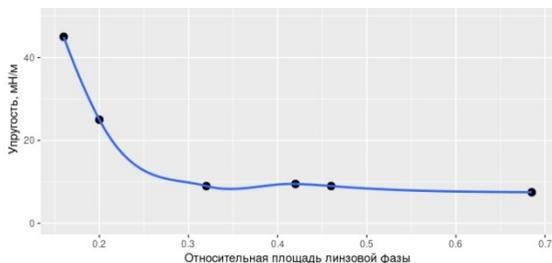
**Рис. 12.** Зависимость относительного коэффициента затухания ГКВ от относительной площади тонкой фазы в эксперименте с додециловым спиртом. Красные точки соответствуют экспериментальным значениям, синие точки соответствуют теоретически предсказываемым значениям. Частота генерации 30 Гц.

В разделе 2.6 описаны эксперименты с нефтью, получена зависимость коэффициента затухания ГКВ от относительной площади линзовой фазы, дано сравнение экспериментальных данных с имеющимися теоретическими данными. Кроме того, введена эффективная упругость пленки как функция относительной площади линзовой фазы, заменяющая имеющуюся неоднородную пленку некоторой эффективной однородной пленкой (рис. 14).



**Рис. 13.** Зависимость коэффициента затухания ГКВ от относительной площади, покрываемой нефтью. Нижняя ветка (синие точки) соответствуют затуханию в мономолекулярном слое (тонкой фазе), верхняя ветка (красные точки) соответствует затуханию в нефтяной пленке (линзовой фазе). Частота ГКВ 15 Гц. Сплошная линия соответствует предложенной в гл. 1. теории затухания на толстой пленке, штрих-пунктирная линия соответствует теоретическому затуханию на мономолекулярной пленке, обе с модельными параметрами  $E_{wf} = 35$  мН/м,  $E_{fa} = 8$  мН/м.

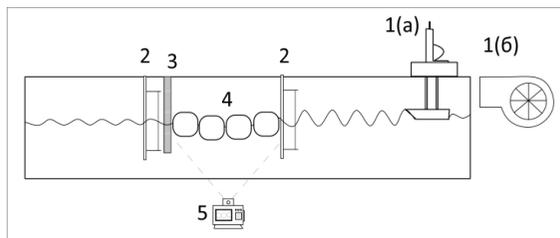
На рис. 13 представлены две ветки: синяя (нижняя) соответствует затуханию в тонком слое, а красная (верхняя) – в линзовой фазе. Сплошная линия соответствует теоретическому затуханию на толстой пленке, штрих-пунктирная линия соответствует теоретическому затуханию на мономолекулярной пленке, обе с модельными параметрами:  $E_{wf} = 35$  мН/м,  $E_{fa} = 8$  мН/м. Можно видеть, что экспериментальные данные хорошо соотносятся с теоретическими, как для маленьких, так и для больших толщин пленки. Затухание же в промежуточных точках определяется меняющейся ролью стенок, которыми становятся границы линзовой фазы. Рост синей ветки, соответствующей затуханию в тонком слое, имеет то же объяснение, что и в случае с простыми веществами – уменьшение размеров новых эффективных кювет, содержащих этот тонкий слой. Аналогично объясняется спадание красной ветки на рис. 13, описывающей затухание в линзовой фазе. При увеличении последней площадь бассейна с линзовой фазой возрастает, а значит, уменьшается коэффициент затухания в ней.



**Рис. 14.** Зависимость параметра упругости от относительной площади линзовой фазы для случая с нефтью.

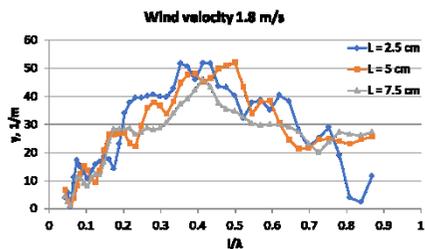
В разделе 2.7 представлены выводы к главе 2. Можно заключить, что величина коэффициента затухания ГКВ характеризуется сильным максимумом при толщине пленки, сравнимой с толщиной пограничного слоя. Показано, что экспериментальные значения затухания ГКВ в присутствии как квазиомолекулярных пленок, так и пленок конечной толщины, находятся в хорошем соответствии с модельными теоретическими значениями. Показано, что коэффициент затухания возрастает с ростом относительной площади толстой пленки (линзовой фазы), соседствующей с тонкой пленкой. Предложена модель линз-стенок, позволяющая связать рост затухания для зависимости, описывающей генерацию при наличии тонкого слоя, с уменьшением размеров новых эффективных кювет, содержащих этот тонкий слой. В **Главе 3** представлено физическое моделирование затухания ГКВ на поверхности воды в присутствии фрагментированного льда. Описаны методики и результаты модельных экспериментальных и натуральных экспериментов. В разделе 3.1 приведено введение к главе 3, описана актуальность задачи изучения взаимодействия волн и фрагментированного льда, приведен обзор литературы, включая теоретически модели, лабораторные и натурные эксперименты. Отмечается, что затухание волн в условиях, когда размеры льдин сравнимы с длинами поверхностных волн, изучено пока недостаточно. В разделе 3.2 представлены результаты лабораторного моделирования затухания гравитационных волн в присутствии имитаторов льда.

Эксперименты проводились в кольцевом ветро-волновом бассейне ИПФ РАН. В качестве имитатора льдин использовались кусочки моющей поролоновой губки. Увлажненная губка возвышалась над поверхностью воды примерно на одну десятую долю ее толщины, подобно льдинам. Проводились серии экспериментов с разным размером «льдин» и разной площадью покрытия. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 15. Результаты зависимостей коэффициента затухания от отношения размера льдины к длине волны представлены на рис. 16 и 17.

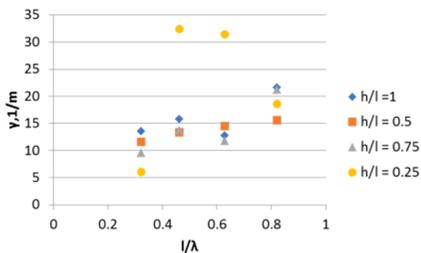


**Рис. 15.** Схема экспериментальной установки (слева): 1(а) – волнопродуктор, 1(б) – вентилятор, 3 – сетка, 4 – область, покрытая льдинами, 2 – два волнографа, 5 – камера. Справа – вид сверху на имитаторы льдин.

Коэффициент затухания существенно зависит от отношения размера неоднородности к длине волны. Для ветрового волнения коэффициент затухания демонстрирует локальный максимум, когда размер льдины составляет примерно половину длины волны. Однако на положение максимума может влиять также отношение длины льдины к ее толщине. Можно видеть, что при небольшой толщине льда длина волны является важным фактором, определяющим коэффициент затухания. При малых толщинах наблюдается резонансная зависимость коэффициента затухания от отношения размера имитатора к длине волны, в то время как при сопоставимой толщине и длине губки максимум размывается.



**Рис. 16.** Зависимость коэффициента затухания от обезразмеренной длины губки  $l/\lambda$  при различных площадях покрытия. Ветровые волны.

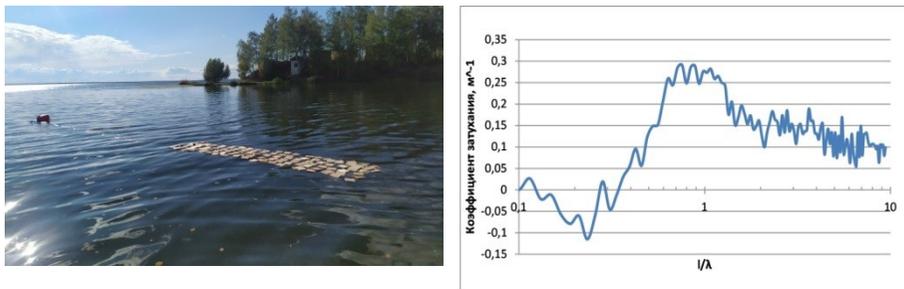


**Рис. 17.** Коэффициент затухания ГКВ в зависимости от безразмерной длины льдины при различных значениях ее толщины. Регулярные волны.

В разделе 3.3 дано обсуждение физического механизма затухания на основе интерпретации с присоединенной массой, предложена простая теоретическая модель. Приведены оценки коэффициента затухания волн с частотами в диапазоне 1,5–5 Гц, которые дают для условий натуральных и численных экспериментов характерные значения 0,4–1,2 м<sup>-1</sup>. Хотя данные значения приближенные, они, тем не менее, неплохо согласуются с экспериментальными и численными величинами, что говорит о существенной роли рассмотренного механизма в затухании гравитационных волн.

В разделе 3.4 представлены описание и результаты специальных натуральных экспериментов по изучению затухания ветровых волн различной длины в присутствии имитаторов льдин. Эксперименты проводились в южной части Горьковского водохранилища в акваториях яхт-клуба «Белая речка» и аванпорт. Аванпорт является промежуточной областью между основной акваторией Горьковского водохранилища и заливом, где располагается яхт-клуб. Фрагментированный ледяной покров имитировался деревянными пластинами размерами 15 × 15 см и толщиной 1,5 см, центр которых привязывался к тонкой капроновой сетке с размерами 1,5 × 5 м (рис. 18, слева). Сетка была эластичной и оказывала незначительное влияние на распространение волн. Амплитуды волн в экспериментах были достаточно малыми, и деревянные пластины практически не сталкивались друг с другом, что позволяет пренебречь

влиянием столкновений на волнение. Измерения волн проводились при помощи четырех миниатюрных акселерометров, установленных на «ледяном поле». На основе анализа записей акселерометров, установленных в начале и в конце «ледяной» структуры, строились усредненные частотные спектры колебаний имитаторов и рассчитывались коэффициенты затухания спектральных компонент волнения (рис. 18, справа).



**Рис. 18.** Фотографии поля имитаторов льдин, привязанных к заякоренному буйку вблизи яхт-клуба (слева) и пример зависимости спектрального коэффициента затухания волн от отношения размера «льдин» к длине волны (справа).

В разделе 3.5 представлены выводы к главе 3. Можно заключить, что в модельных лабораторных и натуральных экспериментах коэффициент затухания характеризуется наличием локального максимума для волн с длинами порядка размеров льдин.

Глава 4 посвящена численному моделированию затуханию ГКВ на поверхности воды в присутствии фрагментированного льда в среде «OpenFOAM». В разделе 4.1 представлено введение к главе 4, описаны возможности и сильные стороны пакета «OpenFOAM», определяющие выбор данного пакета для решения задачи взаимодействия волны и льдины.

В разделе 4.2 Показаны основные уравнения, описаны основные утилиты пакета для численного счета, показана геометрия задачи и описана постановка численного эксперимента. Основными уравнениями, используемыми для численного моделирования, являлись уравнения RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) несжимаемой ньютоновской жидкости:

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \nabla) \vec{U} \right] = -\nabla p + \nabla \vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{f}_a, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $U$  – скорость,  $p$  – давление,  $g$  – ускорение свободного падения. Поверхностное натяжение моделируется как непрерывное поверхностное усилие (НПУ), и  $\vec{f}_a$  означает поверхностную силу на единицу массы;  $\vec{\tau}$  представляет собой сумму вязких и турбулентных напряжений. Последние добавляют в систему уравнений новые неизвестные, это требует до-

полнительных уравнений для замыкания системы. В данной работе используется модель k-epsilon замыкания, формулирующая дополнительные уравнения для скорости турбулентной диссипации и турбулентной кинетической энергии.

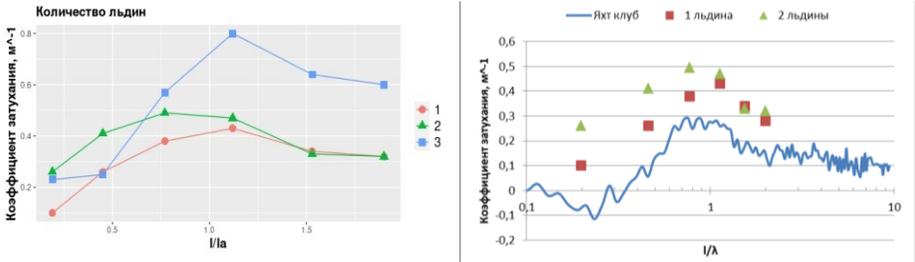
Для отслеживания высоты свободной поверхности использовался метод конечных объемов («VOF») [Jasak, 1996; Rusche, 2002]. Две не смешивающиеся жидкостные фазы (воздух и вода) рассматриваются как одна эффективная жидкость, которая моделируется одновременно во всей расчетной области, при этом функция  $\alpha$  определяет долю конкретной жидкости, которая существует в каждой ячейке, и служит идентификатором местоположения границы раздела вода – воздух. Уравнение для объемной доли  $\alpha$  имеет вид

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla * (\alpha U) + \nabla * (U_r \alpha (1 - \alpha)) = 0, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – объемная доля воды в ячейке, изменяющаяся от 0 до 1 (ячейка полностью заполнена водой или воздухом соответственно). Значение 0,5 приблизительно соответствует границе раздела вода-воздух. Последнее конвективное слагаемое существенно только в тонком пограничном слое, где  $0 < \alpha < 1$ . Локальная плотность и вязкость совокупной жидкости в каждой ячейке определяется как:

$$\rho = \alpha \rho_{water} + (1 - \alpha) \rho_{air}, \quad \mu = \alpha \mu_{water} + (1 - \alpha) \mu_{air}.$$

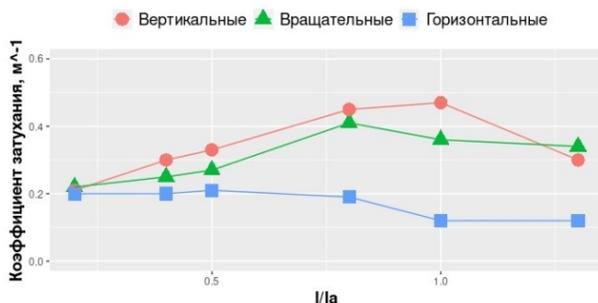
В разделе 4.3 показаны результаты численного моделирования, также дано сравнение с результатами модельного физического эксперимента (рис. 19).



**Рис. 19.** Коэффициент затухания в зависимости от отношения размера льдины к длине волны, результаты численного моделирования (слева). Сравнение результатов натуральных экспериментов (синяя кривая) и результатов численного моделирования (красные и зеленые точки) – справа.

Характерным является наличие локального максимума коэффициента затухания в каждом из случаев, это соответствует результатам натурального эксперимента. Значения коэффициента затухания в модельных экспериментах несколько меньше, чем в численных, что может быть связано с размещением в эксперименте деревянных пластин на специальной сетке, что приводит к

некоторому ограничению их ускорения в поле волны и, как результат, к уменьшению их присоединенной массы. Для анализа наличия локального максимума и изучения его природы, была зафиксирована каждая из степеней свободы плавающего тела, что позволяла телу колебаться, например, только вертикально. По результатам симуляций, в которых фиксировалась каждая из трех степеней свободы колебания тела, получены зависимости коэффициента затухания от отношения размера тела к длине волны. Полученные результаты представлены на рис. 20.



**Рис. 20.** Коэффициент затухания в зависимости от отношения размера льдины к длине волны, для каждой фиксированной степени свободы тела, результат численного моделирования.

Можно видеть, что как чисто вертикальные, так и чисто вращательные колебания приводят к наличию локальных максимумов коэффициента затухания, причем эти максимумы несколько смещены относительно друг друга. Частота волны, при которой достигается максимум её затухания, близка к частоте собственных колебаний тела по двум степеням свободы. Это позволяет нам сделать вывод о возможном резонансном взаимодействии волны с телом при близости частоты волны к частотам собственных колебаний тела, а также о том, что это резонансное взаимодействие обуславливает наличие максимума коэффициента затухания как функции отношения размера тела к длине волны. В разделе 4.4 представлены выводы к главе 4. Можно заключить, что результаты численного моделирования подтвердили, что коэффициент затухания имеет максимум для волн с длинами порядка масштаба льдин. Рассчитанные величины коэффициента затухания удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями. Анализ влияния вращательных и вертикальных колебаний в отдельности на затухание волны позволяет сделать вывод о возможном резонансном взаимодействии волны с телом при близости частоты волны к частотам собственных колебаний тела. Это обуславливает наличие максимума коэффициента затухания как функции отношения размера тела к длине волны.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана приближенная теория затухания гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) при наличии пленок конечной толщины на поверхности воды. Показано, что вихревая компонента ГКВ может быть формально описана как «вынужденная» продольная волна (волна Марангони, VM), которая в основном определяет затухание ГКВ и которая наиболее эффективно возбуждается потенциальной компонентой ГКВ, когда волновые числа ГКВ и собственной моды VM близки. Показано, что для толстой пленки существуют две вынужденные моды VM, локализованные в пограничных слоях соответственно вблизи границ вода – пленка и пленка – воздух, что при определенных значениях параметров упругости границ раздела, толщины и вязкости пленки приводит к возникновению двух максимумов коэффициента затухания ГКВ как функции волнового числа ГКВ из-за резонанса с каждой из вынужденных мод VM.

2. Показано, что величина коэффициента затухания ГКВ характеризуется сильным максимумом при толщине пленки, сравнимой с толщиной пограничного слоя. Зависимость коэффициента затухания ГКВ от волнового числа для толстой пленки с упругими границами оказывается более широкой, чем для тонкой пленки, что может быть использовано как признак толстой пленки. Показано, что экспериментальные значения затухания ГКВ в присутствии как квазиомолекулярных пленок, так и пленок конечной толщины, находятся в хорошем соответствии с модельными теоретическими значениями. В ходе лабораторного моделирования затухания волн на поверхности воды в присутствии неоднородных по толщине пленок, показано, что коэффициент затухания возрастает с ростом относительной площади толстой пленки (линзовой фазы), соседствующей с тонкой пленкой. Предложено физическое объяснение эффекта в рамках модели линз-стенок, уменьшающих площадь поверхности тонкой пленки и, соответственно, увеличивающих затухание волн из-за возрастания влияния стенок.

3. В ходе натуральных и лабораторных экспериментов исследована зависимость коэффициента затухания поверхностных волн от их частоты в присутствии имитаторов фрагментированного льда. Показано, что коэффициент затухания характеризуется наличием локального максимума для волн с длинами порядка размеров льдин.

4. В ходе численного моделирования в среде «OpenFOAM», решена задача взаимодействия тела (льдин) и падающей на него волны, и показано, что коэффициент затухания имеет максимум для волн с длинами порядка масштаба льдин. Рассчитанные величины коэффициента затухания удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями. Дано физическое объяснение эффекта резонансного затухания волны как результата возрастания присоединенной массы льдин, когда частоты их собственных вертикальных и вращательных колебаний близки к частотам волн.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alpers, W. and Huhnerfuss, H.* The damping of ocean waves by surface films: a new look at an old problem // *Journal of Geophysical Research.* – 1989. – 94(C5). – 6251–6266.
2. *Scott, J.C., and Thomas, N.H.* Sea surface slicks - surface chemistry and hydrodynamics in radar remote sensing // *Wind-Over-Wave Couplings: Perspectives and Prospects* (Sajjadi, Thomas and Hunt, Eds.). Clarendon Press. Oxford. 1999. P. 221–229.
3. *Brown, C.E. and Fingas, M.F.* Development of airborne oil thickness measurements // *Marine Pollution Bulletin.* – 2003. – 47. – 485–492.
4. *Cini, R., Lombardini, P. P., and Hühnerfuss, H.* Remote sensing of marine slicks utilizing their influence on wave spectra // *International Journal of Remote Sensing.* – 1983. – 4 (1). – 101–110.
5. *Ermakov, S. A., Zujkova, A.M., Panchenko, A.R., Salashin, S.G., Talipova, T.G., and Titov, V.I.* Surface film effect on short wind waves // *Dynamics of Atmospheres and Oceans.* – 1986. – Vol. 10. – P. 31–50.
6. *Gade, M., Alpers, W., Huhnerfuss, H., Wismann, V., and Lange, P.* On the reduction of the radar backscatter by oceanic surface films: Scatterometer measurements and their theoretical interpretation // *Remote Sensing Environment.* – 1998b. - Vol. 66, no. 1. – P. 52–70.
7. *Hansen, M.W., Kudryavtsev, V., Chapron, B., Brekke, C. and Johannessen, J.A.* Wave Breaking in Slicks: Impacts on C-Band Quad-Polarized SAR Measurements // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* – 2016. – 9(11). – 4929–4940.
8. *Ermakov, S.A., Sergievskaya, I.A., da Silva, J.C., Kapustin, I.A., Shomina, O.V., Kupaev, A.V. and Molkov, A.A.* Remote Sensing of Organic Films on the Water Surface Using Dual Co-Polarized Ship-Based X-/C-/S-Band Radar and TerraSAR-X // *Remote Sensing.* – 2018. – 10. – 1097.
9. *Fiscella, B., Lombardini, P. P., Trivero, P., and Cini, R.* Ripple damping on water surface covered by a spreading film: Theory and experiment // *II Nuovo Cimento.* – 1985. – C8 (5). – 491–500
10. *Gade, M., Alpers, W., Huhnerfuss, H., Masuko, H. and Kobayashi, T.* Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR // *Journal of Geophysical Research.* – 1998a. – Vol. 103. – P. 18851–18866.
11. *Surya Cheemalapati, Heather P. Forth.* Measurement of thickness of highly inhomogeneous crude oil slicks // *Applied optics.* – 2017. – Vol. 56, no. 11.
12. *Massom R., Stammerjohn S.* Antarctic sea ice variability: Physical and ecological implications // *Polar Sci.* – 2010. – V. 4, no.2. – P. 149–458.
13. *Johannessen O.M., Hibler W.D., William E., Campbell J.* Marginal ice zones: a description of air-ice-ocean interactive processes, models and planned experiments // *Arctic Technology and Policy. Proceedings of the Second Annual MIT Sea Grant Conference.* – 1984. - P. 133–146.

14. *Masson D., LeBlond P.* Spectral evolution of wind-generated surface gravity waves in a dispersed ice field // *J. Fluid Mech.*—1989. – V. 202. – P. 43–81.
15. *Kohout A.L., Meylan M.H.* An elastic plate model for wave attenuation and ice floe breaking in the marginal ice zone // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* – 2008. – V. 113, no. C9.
16. *Weber J.E.* Wave attenuation and wave drift in the marginal ice zone // *Journal of Physical Oceanography.* – 1987. – V. 17. No.12. – P. 2351–2361.
17. *Keller J.B.* Gravity waves on ice-covered water // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* – 1998. – V. 103, no. C4. – P. 7663–7669
18. *Williams T.D., Bennets L.G., Squire V.A., Dumont D., Bertino L.* Wave-ice interactions in the marginal ice zone. Part 1: Theoretical foundations // *Ocean Modelling.* – 2013. – V. 71. – P. 81–91.
19. *Jasak, H.* Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows // Ph.D. thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine. 1996.
20. *Rusche, H.* Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions // PhD thesis, Imperial College. 2002.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Ermakov S.A., Khazanov G.E. Resonance damping of gravity–capillary waves on water covered with a visco-elastic film of finite thickness: A reappraisal. // *Physics of Fluids*, 2022. Vol. 34, № 9. P. 10.1063/5.0103110.
2. Хазанов Г.Е., Ермаков С.А., Доброхотов В.А., Лещев Г.В., Купаев А.В., Даниличева О.А. Исследование затухания гравитационных волн на фрагментированном льду // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20, №1. С. 229–241.
3. Khazanov G.E., Ermakov S.A., Vostryakova D.V., Dobrokhotov V.A., Lazareva T.N. Damping of Gravity Waves Due to Ice Floes. Wave Tank Study and Numerical Modeling // *IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2022. Vol. 1. P. 3908–3910.
4. Khazanov G.E., Ermakov S.A., Dobrokhotov V.A., Vostryakova, D.V., Lazareva T.N. Wave tank modeling of the damping of gravity waves due to ice floes in application to ocean remote sensing. // *SPIE Proc.* 2021. Vol. 11857. P. 8.
5. Khazanov, G.E., Ermakov, S. A. Elastic properties of inhomogeneous surfactant films in application to ocean remote sensing. // *SPIE Proc.* 2021. Vol. 11857. P. 6.
6. Хазанов Г.Е., Ермаков С.А., Доброхотов В.А. Затухание гравитационных волн на фрагментированном льду. Натурный эксперимент и численное моделирование. // *Гидродинамические волны и течения : труды школы-семинара «Волны–2023»*. 2023. С. 29.

7. Хазанов Г.Е., Ермаков С.А., Доброхотов В.А., Вострякова Д.В. Лабораторное и численное моделирование затухания гравитационных волн на поверхности воды, покрытой несплоченным льдом. // Нелинейные волны – 2022 : тезисы докладов XX научной школы. 2022. С. 285.
8. Хазанов Г.Е., Ермаков С.А. Затухание гравитационно-капиллярных волн на поверхности воды в присутствии сильно неоднородных пленок поверхностно активных веществ // Труды XXV научной конференции по радиофизике, 2021.
9. Вострякова Д.В., Хазанов Г.Е., Ермаков С.А., Доброхотов В.А. Лабораторное моделирование затухания гравитационных волн на поверхности воды, покрытой несплоченным льдом // Труды XXV научной конференции по радиофизике. 2021. С. 396–399.
10. Хазанов Г.Е., Доброхотов В.А., Лещев Г.В., Ермаков С.А. Экспериментальное и численное моделирование затухания поверхностных волн на фрагментированном льду // Материалы 20-й международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва : ИКИ РАН, 2022. С. 224.
11. Ермаков С.А., Хазанов Г.Е. Анализ затухания гравитационно-капиллярных волн на воде с пленкой конечной толщины в приложении к задачам радиолокационной диагностики нефтяных разливов // Материалы 20-й международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва : ИКИ РАН, 2022. С. 161.
12. Ermakov S.A., Khazanov G.E. Double-resonance damping of gravity-capillary waves on water covered with a visco-elastic film of finite thickness // Waves and vortices in complex media. 2022. С. 15–17.

## ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

### **Введение**

### **Глава 1. Теория затухания гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) на поверхности жидкости, в присутствии вязкоупругой пленкой конечной толщины. Эффект двойного резонанса**

- 1.1. Введение
- 1.2. Основные уравнения и приближения
- 1.3. Продольные волны (Марангони)
- 1.4. Гравитационно-капиллярные волны
- 1.5. Коэффициент затухания ГКВ и эффект двойного резонанса
- 1.6. Выводы к главе 1

### **Глава 2. Теоретическое и лабораторное моделирование затухания ГКВ на воде с неоднородными по толщине пленками**

- 2.1. Введение
- 2.2. Теоретические расчеты коэффициента затухания как функции толщины пленки и сравнение с экспериментом
- 2.3. Лабораторное моделирование неоднородных пленок
- 2.4. Экспериментальное исследование затухания ГКВ на сильно неоднородных пленках
- 2.5. Простая физическая модель затухания на неоднородных пленках
- 2.6. Эксперименты с нефтью
- 2.7. Выводы к главе 2

### **Глава 3. Физическое моделирование затухания ГКВ на поверхности воды в присутствии фрагментированного льда**

- 3.1. Введение
- 3.2. Лабораторный эксперимент
- 3.3. Физический механизм затухания. Теоретическая оценка величины затухания
- 3.4. Модельный натурный физический эксперимент
- 3.5. Выводы к главе 3

### **Глава 4. Численное моделирование затухание ГКВ на поверхности воды в присутствии фрагментированного льда в среде «OpenFOAM»**

- 4.1. Введение
- 4.2. Основные уравнения
  - 4.2.1. Генерация волн
  - 4.2.2. Движение тела
  - 4.2.3. Геометрия задачи
- 4.3. Результаты численных расчетов и сравнение с модельным экспериментом
- 4.4. Выводы к главе 4

### **Заключение**

### **Литература**

**Для заметок**



ХАЗАНОВ Григорий Ефимович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ  
ГРАВИТАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН В ОКЕАНЕ  
В ПРИСУТСТВИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛЕНОК  
И ФРАГМЕНТИРОВАННОГО ЛЬДА**

Автореферат

Подписано к печати 17.10.2023 г.  
Формат  $60 \times 90 \frac{1}{16}$ . Усл. печ. л. 1,75.  
Тираж 100 экз. Заказ № 33 (2023).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46