

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Хазанова Григория Ефимовича

«Исследование затухания гравитационно-капиллярных волн в океане в присутствии поверхностных пленок и фрагментированного льда»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17. Океанология.

Актуальность темы диссертации касательно пленок на морской поверхности связана с загрязнением океана нефтепродуктами и проблемой дистанционного мониторинга загрязнений. В сигналах микроволновых радиолокаторов области фрагментированного льда выглядят похожими на области, покрытые пленкой, что приводит к проблеме их различения. Идентификация зон фрагментированного льда со спутников представляет самостоятельный интерес, по крайней мере, для нужд судоходства. Для Российской Федерации эти темы актуальны, прежде всего, в связи с освоением Арктики и развитием Северного морского пути. Продвижения в этих вопросах представляют непосредственный практический интерес, что определяет **практическую ценность** рассматриваемой работы.

Области загрязнений пленками, как и области фрагментированного льда проявляются при дистанционном зондировании океана благодаря затуханию в них ветровых волн. Волны гравитационно-капиллярного диапазона, ответственные за проявления в сигналах микроволновых радаров, остаются наименее изученными из ветровых волн, а задачи об их реакции на пленки и плавающие кусочки льда являются весьма сложными проблемами современной прикладной гидрофизики. Это определяет **научную ценность** исследований, проведенных в представленной диссертации.

В работе получены следующие **новые научные результаты**:

- путем теоретических рассмотрений получен общий вид зависимости затухания волн от толщины пленки, дана интерпретация этой зависимости в терминах диссипации в двух вынужденных волнах Марангони, локализованных в вязких пограничных слоях воздух-пленка и пленка-вода, сделан вывод о максимуме затухания в случае, когда толщина пленки соответствует толщине погранслоя и оба погранслоя перекрываются;
- в лабораторных экспериментах установлено, что затухание волн в пленках неоднородной толщины («линзы» толстой пленки в окружении мономолекулярной пленки) обусловлено диссипацией энергии в вязких пограничных слоях на границах «линз»;
- в лабораторных, натурных и численных экспериментах установлено, что затухание волн в присутствии фрагментированного льда связано с возбуждением колебательных и вращательных степеней свободы льдинок, и оно максимально, если длина волны сравнима с размером фрагментов льда.

Достоверность теоретических выводов работы основана на применении хорошо апробированных методов теоретической гидродинамики и использовании общепринятых физических представлений, достоверность эмпирических выводов – на сопоставлении результатов лабораторных, натурных и численных экспериментов, полученных в данной работе, и сравнении их с ранее полученными результатами других исследователей. В пользу достоверности говорит и публикация результатов диссертационной работы в рецензируемых журналах, и успешные представления результатов на российских и международных конференциях.

В качестве **положительных особенностей** диссертации следует отметить классический стиль теоретических рассуждений в первой главе, изобретательность автора в получении эмпирической информации как в лабораторных, так и в натуральных экспериментах, привлечение численного моделирования с помощью пакета «OpenFOAM» для понимания физики затухания волн в присутствии фрагментированного льда.

Выполненная работа безусловно заслуживает высокой **общей оценки**. Автору удалось продвинуться, решая очень сложные задачи. Рукопись диссертации хорошо иллюстрирована. В ней адекватно отражены история и современные достижения научных разработок затронутых проблем и дано 107 ссылок на ранее выполненные исследования. Результаты работы опубликованы и широко апробированы на представительных конференциях. Автореферат правильно передает содержание рукописи диссертации.

Текст диссертации состоит из введения, четырех глав и заключения с выводами. Введение имеет стандартную структуру и включает обоснование актуальности работы, её практической и научной значимости, представляет положения, выносимые на защиту, а также содержит все другие обязательные подразделы, определенные процедурой защиты.

Глава 1 посвящена построению аналитической теории затухания гравитационно-капиллярных волн в толстых пленках. В ней последовательно рассмотрены уравнения и граничные условия для волновых движений малой амплитуды в двухслойной вязкой жидкости, моделирующей пленку конечной толщины на поверхности воды; чисто вихревые волны (продольные волны Марангони), которые имеют две моды, локализованные в вязких пограничных слоях на границах раздела пленка-воздух и пленка-вода; получено дисперсионное соотношение для гравитационно-капиллярных волн, учитывающее обе моды вынужденных волн Марангони; получено аналитическое выражение для коэффициента затухания гравитационно-капиллярных волн и показано, что в случае толстой пленки моды Марангони возбуждаются резонансным образом, когда волновое число близко к одному из волновых чисел свободных мод Марангони, что приводит к двухпиковому характеру зависимости затухания от волнового числа. Теоретические рассуждения продолжены в начале Главы 2, где обнаружено, что максимальное затухание в толстой пленке достигается, когда толщина пленки соответствует толщине пограничного слоя и оба пограничных слоя перекрываются.

Продолжение Главы 2 посвящено лабораторным экспериментам с толстыми пленками. В натуральных условиях при разливе нефтепродуктов по морской поверхности образуются толстые пленки неоднородной толщины, когда «линзы» загрязнений плавают в окружении мономолекулярной пленки. Соискатель проявил изобретательность при моделировании и исследовании именно такой ситуации в лабораторных условиях. «Двухфазная пленка» (линза и монослой) моделировалась в кювете, где происходило параметрическое возбуждение гравитационно-капиллярных волн и измерялось их затухание. В результате было обнаружено, что затухание волн в «двухфазной пленке» определяется диссипацией энергии на границах линз в областях возникающих там вязких пограничных слоев.

Глава 3 посвящена лабораторным и натурным экспериментам по затуханию волн в области фрагментированного льда. Автор осуществил это исследование, остроумно имитируя фрагментированный лед кусочками поролоновой губки и деревянными пластинами так, что плотность имитаторов соответствовала плотности льда. Лабораторные эксперименты были проведены в кольцевом ветро-волновом бассейне ИПФ РАН, натурные эксперименты – в Горьковском водохранилище. Было установлено, что коэффициент затухания волн существенно зависит от отношения размера имитаторов льда к длине волны, причем локальный максимум коэффициента затухания достигается, когда этот размер составляет примерно половину длины волны. Автор дал интерпретацию этому результату

в терминах присоединенной массы. Натурные эксперименты в целом подтвердили результаты экспериментов в лотке.

Глава 4 посвящена численному моделированию затухания гравитационно-капиллярных волн в присутствии фрагментированного льда в среде «OpenFOAM». Движение жидкости в этом пакете описывается уравнениями RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) несжимаемой ньютоновской жидкости, дополненными уравнения замыкания в рамках модели турбулентности k-epsilon. В жидкость помещалось свободно плавающее тело, имитирующее фрагмент льда, которое могло двигаться со всеми допустимыми степенями свободы. Было обнаружено, что максимальное затухание волн связано с возбуждением колебаний тела по вертикали и его вращательных колебаний. Интенсивность этих колебаний максимальна, если длина возбуждающей волны примерно в два раза превышает размер плавающего тела. Этот результат объясняет результаты лабораторных и натурных экспериментов, представленные в Главе 3.

Замечания, вопросы, рекомендации на будущее

1. Сравнение рисунков 36-34 (эксперимент в лабораторном лотке) и 40-41 (натурный эксперимент) вызывает законное удивление - коэффициенты затухания в двух экспериментах различаются на два порядка величины. Этот момент необходимо было бы специально пояснить в тексте.

2. Хотя в работе проведены безусловно красивые эксперименты, Глава 2, где они описаны, слишком лаконично изложена и оставляет много вопросов:

- Понимание фотографий облегчилось бы, если в тексте или подрисовочных подписях были бы указаны размеры, в особенности ширина, кюветы.

- Неясно, как из формулы (71) найти вязкость воды.

- Проверилась ли формула (73) (затухание на стенках и дне кюветы) экспериментально в условиях чистой воды без пленок? Об этом уместно было бы сообщить из-за важности этой формулы для выводов главы.

- В главе неоднократно встречается утверждение «уменьшение площади пленки приводит к росту коэффициента затухания», например, на стр. 60, последний абзац: «Это позволяет связать рост затухания для зависимости, описывающей генерацию при наличии тонкого слоя, с уменьшением размеров новых эффективных кювет, содержащих этот тонкий слой. Коэффициент затухания при уменьшении площади растет согласно формуле (76).» - Здесь по физическому смыслу важно не «уменьшение площади», а рост протяженности границ, в пограничном слое которых и происходит диссипация механической энергии. Об этом следовало хотя бы один раз сказать открытым текстом, чтобы раскрыть физику весьма важного результата этих экспериментов.

- Неясно, какой коэффициент затухания показан на рис 24 и 25? Измеренный или скорректированный по формуле (76)?

- Выводы к главе, «Теоретические расчеты в рамках гипотезы “линз-стенок” показали хорошее согласие с экспериментом.» - из текста неясно, что это за расчеты и как именно они сравнивались с экспериментом.

3. Рукопись содержит неточности в терминологии и смысловые неясности:

- с. 50 «Если рассматривать данные радара, взятые поперек ветра, можно исключить влияние последнего, и считать, что отношение радиолокационного сигнала в пленке и в

воде, равно обратному отношению коэффициента затухания в плёнке и в воде.» - это верно, только если нелинейные взаимодействия для гравитационно-капиллярных волн несущественны.

- В рукописи неоднократно используется сленг «две ветки» (например, на с. 61) при обсуждении двух кривых на одном графике.

- с. 65 «Физика взаимодействия волн со льдом важна и при описании взаимодействия динамики последнего.» - здесь не ясно даже, что автор имел в виду.

- Чтобы показать, важна ли присоединенная масса, следовало бы обсудить, как соотносятся члены в уравнении (79). Иначе утверждение о её важности выглядит голословным.

4. Рукопись содержит опечатки и недочеты, связанные с недостаточной аккуратностью автора:

- с.25, ур-е(27) числитель и знаменатель дроби одинаковы.

- с 33 ур-е (62) « $z < 1$ » должно быть $z > 1$.

- с. 33, вторая и третья строки с конца –пропущен показатель степени -1 у скобки.

- с 36, рис 3 почему номера рисунков (а) и (с), а не (а) и (b)?

- с 37 сверху - пропущен квадрат для k.

- с. 41, странная подпись к рис. 6 «3-d относительного коэффициента ...».

- с. 41 последняя строка «наша теория в целом согласуется с результатами.» Какими результатами?

- Рис.12, подпись к рисунку – по-видимому, пропущена строка (или несколько), нет пояснений к сплошной линии

- В уравнении (70) не пояснено обозначение δg .

- Рис.27 не упомянут в тексте. Это результат эксперимента или модельного расчета?

- Нет ссылок в тексте на рис. 28 и 29. Не указано, откуда они заимствованы.

- с. 68 «Оценка амплитуды вариаций УЭПР на масштабах зыби, нормированных на среднее значение УЭПР, дает значения 0.45 на разрезе 1 (т.е., после прохождения ледяной структуры в пределах отрезка 2) и 0.56 на разрезе 3 до ледяной структуры» - Что такое отрезок (2) и разрез 3? Об этом ничего не сказано ни в тексте, ни в подрисовочных подписях.

- Уравнение (79) написано с ошибкой, размерности членов в скобке различаются.

- с. 89 «При этом амплитуда и частота колебаний хорошо совпадают со значениями, получаемыми в эксперименте.» - В каком эксперименте? Где его описание в тексте? Или где ссылка, если это эксперимент других авторов?

Перечисленные замечания не имеют принципиального характера и не нарушают общей положительной оценки диссертации работы. Работа очень интересна, а полученные результаты важны и физически непротиворечивы. Обсуждаемая рукопись хорошо скомпонована и легко читается.

Заключение по диссертационной работе

Считаю, что диссертационная работа «Исследование затухания гравитационно-капиллярных волн в океане в присутствии поверхностных пленок и фрагментированного льда» удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Хазанов Григорий Ефимович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17. Океанология.

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент
главный научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федеральный исследовательский центр
«Морской гидрофизический институт РАН»,
(299011, г. Севастополь, ул. Капитанская 2)
+79780078496, dulov@mhi-ras.ru,
доктор физико-математических наук,



Дулов Владимир Александрович

30 ноября 2023 г.

Подпись Дулова Владимира Александровича заверяю
Ученый секретарь
ФГБУН ФИЦ МГИ,
кандидат физико-математических наук
30 ноября 2023 г.



Д.В. Алексеев

Статьи В.А. Дулова по тематике диссертации, опубликованные в последние годы:

1. Dulov VA, Skiba EV, Kubryakov AA. Landsat-8 Observations of Foam Coverage under Fetch-Limited Wave Development. *Remote Sensing*. 2023; 15(9):2222. doi:10.3390/rs15092222
2. Бондур В. Г., Дулов В. А., Козуб В. А., Мурынин А. Б., Юровская М. В., Юровский Ю. Ю. Восстановление углового распределения энергии морских волн по спектрам спутниковых изображений // ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2023, том 509, № 1, с. 125–133. doi: 10.31857/S2686739722602575, EDN: TJKUAM
3. Bondur V., Dulov V., Kozub V., Murynin A., Yurovskaya M., Yurovsky Y. Validation of the Satellite Method for Measuring Spectra of Spatially Inhomogeneous Sea Waves // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Т. 10. № 10. С. 1510. doi:10.3390/jmse10101510.
4. Кориненко А.Е., Малиновский В.В., Дулов В.А., Кудрявцев В.Н. Оценка времени жизни «барашка» обрушивающейся волны // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 1. С. 61–72. doi: 10.48612/fpg/5g5t-4mzd-94ab
5. Dulov, V.A.; Korinenko, A.E.; Kudryavtsev, V.N.; Malinovsky, V.V. Modulation of Wind-Wave Breaking by Long Surface Waves. // *Remote Sensing*. 2021, 13, 2825. <https://doi.org/10.3390/rs13142825>
6. Дулов В. А., Юровская М. В. Спектральные контрасты коротких ветровых волн в искусственных слайках по фотографиям морской поверхности // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 3. С. 373–386. doi:10.22449/0233-7584-2021-3-373-386
7. Dulov V., Kudryavtsev V., Skiba E., On fetch- and duration-limited wind wave growth: Data and parametric model. // *Ocean Modelling*. Volume 153, September 2020, 101676 (9p) <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101676>
8. Yurovsky Yu. Yu., Dulov V. A., MEMS-based wave buoy: Towards short wind-wave sensing // *Ocean Engineering*, Volume 217, 2020, 108043 (13p), <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108043>. (Q1, JCR: 2.73, SJR: 1.281)
9. Guimaraes P.V., Ardhuin F., Bergamasco F., Leckler F., Filipot J-F, Shim, J-S, Dulov V., Benetazzo A. A data set of sea surface stereo images to resolve space-time wave fields // *Scientific Data* 7, 145 (12p), 2020. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0492-9>
10. В. Г. Бондур, В. А. Иванов, В. Е. Воробьев, В. А. Дулов, В. В. Долотов, В. В. Замшин, С. И. Кондратьев, М. Е. Ли, В. В. Малиновский. Наземно-космический мониторинг антропогенных воздействий на прибрежную зону Крымского полуострова // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 1. С. 103–115. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-103-115 <http://xn--c1agq7a.xn--p1ai/index.php/repository?id=911>
11. Кориненко А. Е., Малиновский В. В., Кудрявцев В. Н., Дулов В. А. Статистические характеристики обрушений и их связь с диссипацией энергии ветровых волн по данным натурных измерений // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 5. С. 514–531. doi:10.22449/0233-7584-2020-5-514-531
12. Перспективы радиолокационного мониторинга скорости ветра, спектров ветровых волн и скорости течения с океанографической платформы // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2023. № 3. С. 40–54.) EDN OFYNOG