

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
физики твёрдого тела Российской академии наук

На правах рукописи

Ремизов Игорь Андреевич

**ДИСКРЕТНАЯ ВОЛНОВАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ
НА ПОВЕРХНОСТИ КВАНТОВОЙ ЖИДКОСТИ**

РЕЗЮМЕ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твёрдого тела Российской академии наук.

Научный руководитель: Левченко Александр Алексеевич, доктор физико-математических наук, доцент, директор федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела Российской академии наук

ТЕМА ДИССЕРТАЦИИ

В представленной работе экспериментально изучены явления в турбулентных волновых системах на поверхности жидкости, которые возникают из-за дискретности пространства волновых векторов. Турбулентное состояние системы нелинейных волн, в котором дискретность пространства волновых векторов приводит к дополнительным резонансным ограничениям на возможные процессы взаимодействия волн, называется дискретной волновой турбулентностью [1, 2]. Интерес к проблеме дискретной турбулентности обусловлен следующими причинами. Дополнительные резонансные ограничения могут привести к возникновению локальных особенностей в прямом турбулентном каскаде. Также в режиме дискретной турбулентности возможно формирование обратного потока энергии из-за того что процессы передачи энергии в прямом турбулентном каскаде подавлены в силу дискретности. Кроме того волновые системы в реальном мире так или иначе ограничены, поэтому для сравнения предсказаний теории с результатами эксперимента необходимо четкое понимание особенностей дискретной турбулентности.

Несмотря на развитие теории дискретной волновой турбулентности систематические экспериментальные исследования в данном направлении практически не проводились. Поэтому получение экспериментальной информации о дискретной волновой турбулентности является фундаментальной научной проблемой в современной физике.

Система нелинейно взаимодействующих волн на поверхности идеальной жидкости является удобным модельным объектом для исследования дискретной волновой турбулентности. Однако все реальные жидкости имеют конечную вязкость, что приводит к уширению поверхностных колебаний. Если вязкость велика, уширенные резонансы перекрываются друг с другом и система перестает быть дискретной. Следовательно, для экспериментального исследования дискретной турбулентности требуется жидкость с очень малым значением вязкости. Поэтому, наиболее подходящими жидкостями для данных исследований являются жидкий водород и сверхтекучий гелий-4, кинематическая вязкость которых очень мала по сравнению с такими жидкостями, как вода.

В выполненных ранее в нашей лаборатории экспериментальных работах по волновой турбулентности на поверхности жидкого водорода М.Ю. Бражниковым была применена оригинальная экспериментальная методика возбуждения и регистрации волн на заряженной поверхности жидкого водорода [3]. Эта методика была адаптирована Л.В. Абдурахимовом [4] для изучения волновой турбулентности на поверхности сверхтекучего гелия-4. Данная методика была использована и в обсуждаемых ниже экспериментах по исследованию дискретной волновой турбулентности в квантовых жидкостях.

Цель диссертационной работы: Исследование дискретной волновой турбулентности в системе волн на поверхности сверхтекучего гелия и жидкого водорода в резонаторе конечных размеров. Для достижения поставленной цели требовалось решение следующих **задач**:

1. Определение оптимальных экспериментальных условий, при которых на поверхности жидкости реализуется режим дискретной турбулентности. Выбор форм и размеров экспериментальных ячеек.
2. Изготовление экспериментальных ячеек, предназначенных для исследования нелинейных волн на поверхности жидкого гелия и водорода.
3. Изучение особенностей в турбулентных спектрах поверхностных волн в режиме дискретной турбулентности при высоких уровнях накачки. Сравнение результатов измерений с предсказаниями теории.

Научная новизна:

1. Впервые показано, что выбором спектральной характеристики возбуждающей силы и дискретности в спектре собственных колебаний жидкости в резонаторе (экспериментальной ячейке), изменяя размеры и форму экспериментальной ячейки, удается создать оптимальные условия для формирования потока энергии не только в высокочастотную область турбулентного спектра (прямой турбулентный каскад Колмогорова-Захарова) [5, 6], но и в низкочастотную.
2. Впервые оценён коэффициент трёхволнового взаимодействия в системе гравитационно-капиллярных волн на поверхности жидкого водорода в прямоугольной ячейке.
3. Впервые обнаружено формирование динамического локального максимума вблизи высокочастотного края инерционного интервала турбулентного спектра на поверхности жидкого водорода в цилиндрической ячейке.
4. Впервые подробно изучена неустойчивость Кельвина-Гельмгольца на свободной поверхности He-II, индуцированная постоянным потоком тепла в объёме жидкости.

Теоретическая и практическая ценность полученных результатов заключается в расширении современных теоретических представлений о механизмах переноса энергии в системах нелинейных волн. Квантовые жидкости находят широкое применение в современной космической технике (криогенное топливо, системы охлаждения чувствительных элементов разного рода детекторов и телескопов), в системах охлаждения мощных сверхпроводящих соленоидов. Таким образом понимание турбулентных волновых процессов на свободной поверхности квантовой жидкости в контейнере конечных размеров может иметь практическую ценность при работе с криогенными жидкостями.

Достоверность полученных результатов Результаты наших измерений согласуются с экспериментальными данными других авторов и предсказаниями теории в той части, где перекрываются области их применимости.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально наблюдается формирование обратного потока энергии в режиме дискретной турбулентности при монохроматической накачке в системе капиллярно-гравитационных волн на поверхности жидкого водорода и сверхтекучего гелия.
2. Изучено формирование субгармоник в режиме дискретной волновой турбулентности на поверхности жидкого водорода в капиллярно-гравитационной области спектра собственных колебаний ячейки и оценён коэффициент трёхволнового взаимодействия.
3. Обнаружено формирование динамического локального максимума, который возникает в турбулентном спектре вблизи высокочастотного края инерционного интервала в результате возникновения узкого горла, обусловленного конечным вязким затуханием в инерционном интервале и дискретностью спектра собственных колебаний ячейки.
4. Наблюдена неустойчивость свободной поверхности сверхтекучего He-II Кельвина-Гельмгольца, индуцированная постоянным потоком тепла в объёме при плотности потока выше некоторой пороговой.

Личный вклад. Автор непосредственно участвовал в постановке экспериментальных задач и их решении, а также в обсуждении полученных результатов и написании статей. Диссертационная работа выполнена в лаборатории квантовых кристаллов ИФТТ РАН в период с 2010 по 2018 г.

ПУБЛИКАЦИИ И АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Публикации повышенного уровня

1. L. V. Abdurakhimov, M. Arefin, G. V. Kolmakov, A. A. Levchenko, Yu. V. Lvov, and I. A. Remizov, «Bidirectional energy cascade in surface capillary waves», *Physical Review E*. – 2015. – V. 91. – I. 2. – P. 23021.

Публикации стандартного уровня

1. М. Ю. Бражников, А. А. Левченко, Л. П. Межов-Деглин, И. А. Ремизов, «Низкочастотные субгармоники в турбулентном спектре на поверхности жидкого водорода», *Письма в ЖЭТФ* – 2014. – Т. 100. – № 10. – С. 754–759.

2. Л. В. Абдурахимов, М. Ю. Бражников, А. А. Левченко, А. М. Лихтер, И. А. Ремизов, «Формирование низкочастотных гармоник на поверхности жидкого водорода и гелия в турбулентном режиме», Физика Низких Температур. – 2015. – № 41. – С. 215–222.
3. M. Yu. Brazhnikov, A. A. Levchenko, L. P. Mezhov-Deglin, I. A. Remizov, «Wave turbulence on the surface of liquid hydrogen in restricted geometry: the influence of the boundary conditions», Low Temperature Physics. – 2015. – V. 41. – № 6. – P. 484–487.
4. I. A. Remizov, M. Yu. Brazhnikov, A. A. Levchenko, «Observation of dynamic maximum in a turbulent cascade on the surface of liquid hydrogen», Low Temperature Physics. – 2016. – V. 42. – I. 12. – P. 1067–1070.
5. I. A. Remizov, A. A. Levchenko, L. P. Mezhov-Deglin, «Instability on the Free Surface of Superfluid He-II Induced by a Steady Heat Flow in Bulk», Journal of Low Temperature Physics. – 2016. – V. 185. – I. 3. – P. 324–338.

Доклады на конференциях и семинарах

Основные результаты диссертационной работы доложены на следующих конференциях

1. 9-th International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals CC-2012 (Odessa, Ukraine, September 2012)
2. Совещание по физике низких температур НТ-36 (Санкт-Петербург, Июль 2012).
3. Конференция «Турбулентность и Волновые Процессы» (Москва, Ноябрь 2013).
4. XXII Научная сессия Совета РАН по нелинейной динамике (Москва, Декабрь 2013).
5. VII-th International Conference «SOLITONS COLLAPSES AND TURBULENCE: Achievements, Developments and Perspectives» (SCT-14) in honor of Vladimir Zakharov's 75th birthday (Chernogolovka, Russia, August 2014.).
6. 10th International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals (Almaty, Kazakhstan, August 2014).
7. XXIII Научная сессия Совета РАН по нелинейной динамике (Москва, Декабрь 2014).
8. XXIV Научная сессия Совета РАН по нелинейной динамике (Москва, Декабрь 2015).
9. 11th International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals (Turku, Finland, August 2016).
10. XXV Научная сессия Совета РАН по нелинейной динамике (Москва, Декабрь 2016).

СОДЕРЖАНИЕ И СТРУКТУРА РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и выводов. Общий объём диссертации 101 страница, включая 39 рисунка, одну таблицу и список литературы.

В **введении** приводятся подтверждения актуальности темы диссертации, формулируются цели работы и положения, выносимые на защиту, описывается структура работы.

Первая глава содержит введение в предмет исследования, дан краткий обзор современных теоретических представлений и экспериментальных результатов исследования дискретной турбулентности, накопленных к моменту постановки данной работы.

Во второй главе описаны экспериментальная установка, методика возбуждения и регистрации капиллярно-гравитационных волн на поверхности жидкого водорода и сверхтекучего гелия.

Третья глава посвящена наблюдениям субгармоник в стационарном турбулентном спектре на поверхности жидкого водорода и сверхтекучего гелия.

В четвёртой главе приведены результаты изучения динамики формирования и затухания субгармоник на поверхности жидкого водорода.

В пятой главе представлены результаты экспериментального наблюдения динамического максимума в турбулентном спектре вблизи высокочастотной границы инерционного интервала вследствие накопления энергии в системе капиллярных волн на поверхности жидкого водорода, возбуждаемого внешней гармонической силой.

Шестая глава посвящена исследованию неустойчивости типа Кельвина-Гельмгольца на поверхности сверхтекучего He-II, которая возникает при протекании в объеме потока тепла, плотностью выше некоторой пороговой.

В заключении перечислены основные результаты работы и сформулированы выводы.

Литература

- [1] E. Kartashova, *Europhys. Lett.* **87**, 44001 (2009).
- [2] V. S. L'vov and S. Nazarenko, *Phys. Rev. E* **82**, 056322 (2010).
- [3] М. Ю. Бражников, А. А. Левченко, Л. П. Межов-Деглин, *Приборы и Техника Эксперимента*, **45**, 31-37 (2002).
- [4] L. V. Abdurakhimov, M. Yu. Brazhnikov, G. V. Kolmakov, A. A. Levchenko, and L. P. Mezhev-Deglin, *J. Low Temp. Phys.* **148** (3-4), 245-249 (2007).

- [5] V. Zakharov, V. Lvov, G. Falkovich Kolmogorov Spectra of Turbulence I, Vol. 1, Springer-Verlag, Berlin (1992).
- [6] Vladimir Zakharov, Frederic Dias, Andrei Pushkarev, Physics Reports **398** (2004) 1–65.