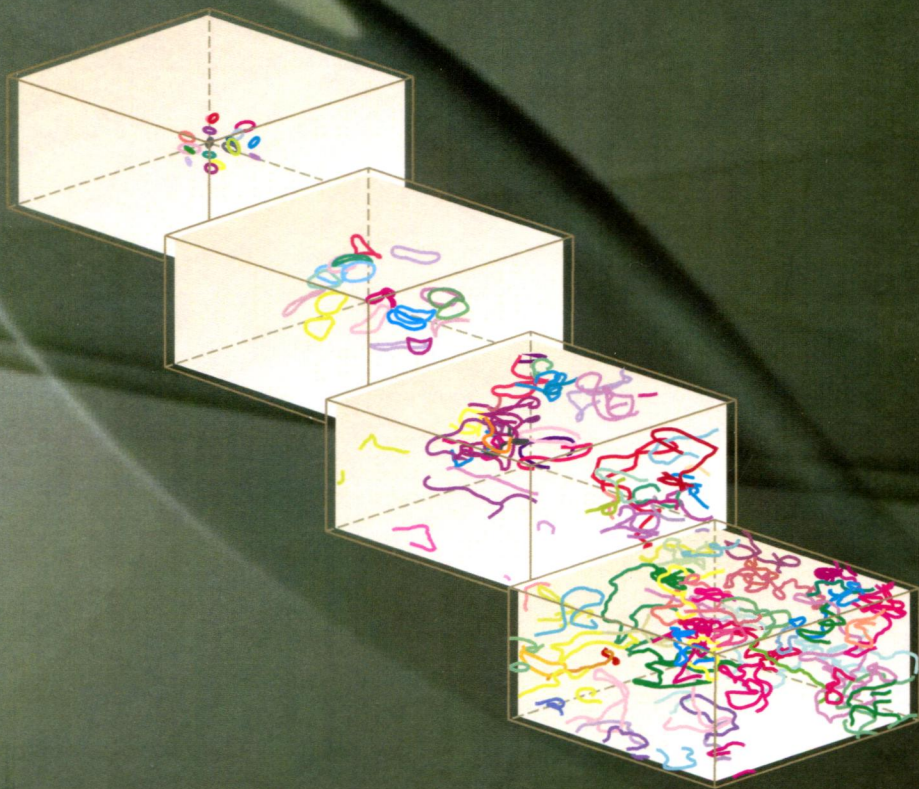


С.К. НЕМИРОВСКИЙ

**ГИДРОДИНАМИКА
КВАНТОВЫХ ЖИДКОСТЕЙ
ВОЛНЫ, ВИХРИ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ**

**Часть 2. Квантовые вихри,
сверхтекучая турбулентность**



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С. С. КУТАТЕЛАДЗЕ

С. К. Немировский

**ГИДРОДИНАМИКА КВАНТОВЫХ ЖИДКОСТЕЙ.
ВОЛНЫ, ВИХРИ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ**

ЧАСТЬ 2

Квантовые вихри, сверхтекучая турбулентность

Ответственный редактор
доктор физико-математических наук

П. А. Куйбин



НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
2016

УДК 532
ББК 22.253.3
Н 50

Немировский, С. К.

Гидродинамика квантовых жидкостей. Волны, вихри, турбулентность. Часть 2: Квантовые вихри, сверхтекучая турбулентность / С. К. Немировский; отв. ред. П. А. Куйбин; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т теплофизики. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. — 293 с.

Книга представляет собой вторую часть монографии, посвященную различным аспектам гидродинамики квантовых жидкостей. В ней излагается теория квантовых вихрей — уникального явления, происходящего из самой квантово-механической природы сверхтекучих жидкостей. Рассматривается концепция квантовых вихрей и приводится ряд классических результатов, как теоретических, так и экспериментальных. Большая часть книги посвящена популярной в настоящее время теории квантовой турбулентности, связанной с хаотической динамикой квантовых вихрей.

Монография рассчитана на физиков и инженеров, непосредственно занимающихся изучением и техническим применением квантовых жидкостей, а также на специалистов других областей, желающих глубже ознакомиться с этими интересными явлениями. Она также предназначена для студентов и аспирантов, специализирующихся в области физики низких температур и гидродинамики сложных систем.

Рис. 55. Библ. 210 назв.

*Утверждено к печати Ученым советом
Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН*

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, проф. Ю. Н. Григорьев

д-р физ.-мат. наук В. Б. Ефимов

д-р техн. наук, проф. А. П. Крюков

Подготовка данной монографии, а также вошедшие в нее исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00093)

ISBN 978-5-7692-1482-0 (часть 2)
ISBN 978-5-7692-1480-6

©Немировский С. К., 2016
©Издательство СО РАН, 2016

231298

Оглавление

Предисловие	8
1. Квантовые вихри. Исторический обзор	11
1.1. Вихри Онзагера — Фейнмана	11
1.2. Ранние эксперименты	20
2. Вихревые линии в квантовых жидкостях: динамика и структура	33
2.1. Вихревая динамика: Уравнения движения	35
2.1.1. Движение линий в квантовых жидкостях	35
2.1.2. Движение линий в бозе-эйнштейновском конденсате	44
2.2. Вихревая динамика: пересоединение (Reconnection) линий	53
2.2.1. Этап 1. Столкновение нитей	53
2.2.2. Этап 2. Динамика внутри ядер вихревых нитей	57
2.3. Характеристики вихревого клубка	61
2.3.1. Геометрические свойства	62
2.3.2. Динамические характеристики	69
3. Сверхтекучая турбулентность, введение в предмет	81
3.1. Введение и обзор	81
3.2. Вихревая динамика и квантовая турбулентность	91
3.3. Сценарий Фейнмана	96
3.4. Феноменологическая теория Вайнена	99
4. Аналитические исследования 1: динамика линий без учета реконнекций	108
4.1. Кинетическое уравнение для распределения длины в пространстве кривизны	109
4.2. Ланжевеновская постановка задачи	117
4.2.1. Функциональный формализм	117
4.2.2. Термодинамическое равновесие в системе хаотических квантованных вихрей	120

4.2.3.	Тепловое равновесие вихревых линий в противотоке $He\ II$	125
4.3.	Хаотические малые возмущения на вихревых линиях. Нелинейные волны Кельвина	130
4.4.	Хаотическая динамика вихревой петли. Приближение прямого взаимодействия	135
5.	Аналитические исследования 2: кинетика колец и петель	147
5.1.	Модели взаимодействующих идеальных (или слабо неидеальных) вихревых колец	147
5.2.	Гауссова модель	149
5.2.1.	Обобщенное распределение Винера	149
5.2.2.	Характеристический функционал $W(\{\mathbf{P}(\xi, t)\})$	155
5.3.	Кинетика сети гауссовых вихревых петель	157
5.3.1.	Кинетическое уравнение	157
5.3.2.	Вычисление коэффициентов $A(l_1, l_2, l)$ и $B(l, l_1, l_2)$	159
5.3.3.	Точное решение кинетического уравнения	164
5.4.	Кинетика петель и теория квантовой турбулентности	170
5.4.1.	Свойства вихревого клубка при нулевой температуре	170
5.4.2.	”Чистый” поток P_{net} и плотность вихревых линий	173
5.4.3.	Полная интенсивность реконнекций	174
5.4.4.	Уравнение Вайнена	175
6.	Гидродинамика сверхтекучей турбулентности	181
6.1.	Постановка задачи	181
6.2.	Неупорядоченные вихревые клубки	182
6.3.	Случай вихревых пучков	191
7.	Приложения гидродинамики сверхтекучей турбулентности	197
7.1.	Взаимодействие между вторым звуком и противотоком	198
7.2.	Распространение интенсивных тепловых импульсов, генерирующих вихри и взаимодействующих с ними	200

7.2.1.	Генерация вихрей в интенсивных тепловых импульсах	200
7.2.2.	Уравнения эволюции мощных тепловых импульсов	203
7.2.3.	Эволюция интенсивных тепловых импульсов. Аналитическое исследование	204
7.2.4.	Эволюция интенсивных тепловых импульсов. Численные исследования	207
7.3.	Передача тепла и кипение He II	213
7.4.	Генерирующий член или остаточные вихри?	217
7.5.	Аномальный распад вихревого клубка	218
7.6.	Эффект “сухого” трения. Справедливость и интерпретация уравнения Вайнена	220
8.	Приложения гауссовой модели	224
8.1.	Гидродинамический импульс вихревого клубка	224
8.1.1.	Статические свойства	224
8.1.2.	Динамика импульса Лэмба	226
8.1.3.	Несохранение импульса Лэмба	228
8.2.	Динамика неоднородной квантовой турбулентности	231
8.2.1.	Диффузия вихревого клубка	231
8.3.	Распространение турбулентных фронтов	234
8.4.	Распад квантовой турбулентности при нулевой температуре	235
8.4.1.	Затухание плотности вихрей и квазиклассическое поведение квантовой турбулентности	235
8.4.2.	Диффузионное затухание квантовой турбулентности	237
8.5.	Энергетический спектр трехмерного поля скорости, индуцируемого вихревыми нитями. Фрактальная вихревая нить	240
8.5.1.	Энергетический спектр и характеристический функционал	240
8.5.2.	Модели вихревой нити	243
8.5.3.	Определение энергетического спектра	245
8.6.	Энергетический спектр трехмерного поля скорости, индуцируемого вихревыми нитями. Реконструирующие вихревые нити	250

8.6.1.	Роль сингулярных решений в формировании спектров турбулентности	250
8.6.2.	Форма кривых реконnectирующих вихревых линий	252
8.6.3.	Аналитическое вычисление спектра	254
Список литературы		259