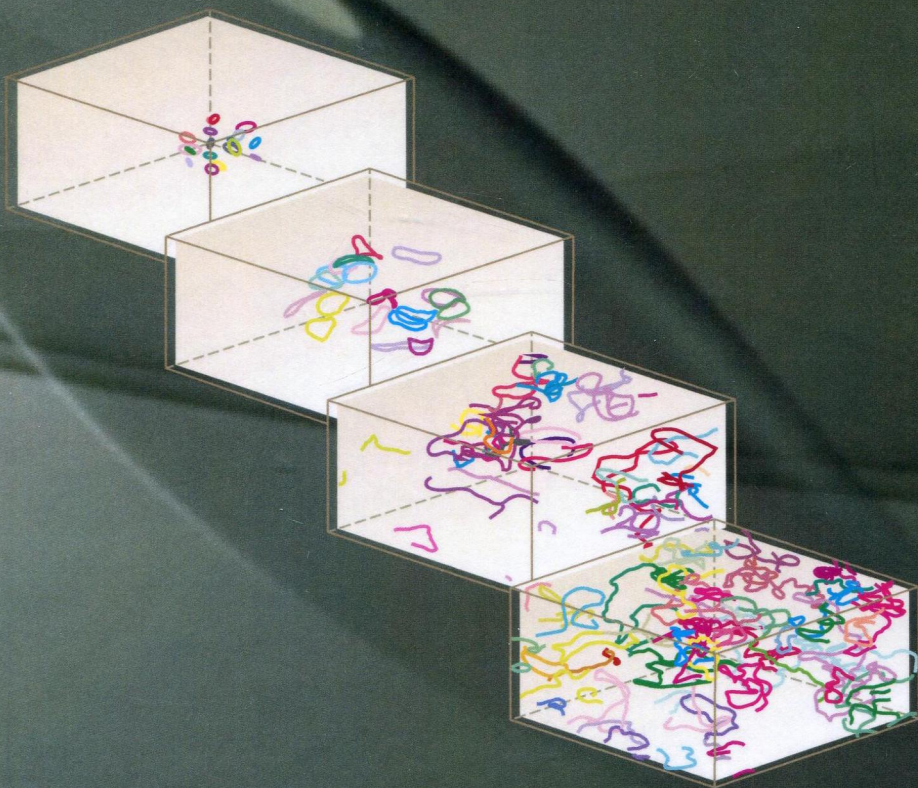


С.К. НЕМИРОВСКИЙ

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

Часть 1. Безвихревое движение



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

С. К. Немировский

ГИДРОДИНАМИКА КВАНТОВЫХ ЖИДКОСТЕЙ.
ВОЛНЫ, ВИХРИ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

ЧАСТЬ 1

Безвихревое движение, нелинейная акустика

Ответственный редактор
доктор физико-математических наук
П. А. Кузбин



НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
2015

УДК 532
ББК 22.253.3
Н 50

Немировский, С. К.

Гидродинамика квантовых жидкостей. Волны, вихри, турбулентность. Часть 1: Безвихревое движение, нелинейная акустика / С. К. Немировский; отв. ред. П. А. Куйбин; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т теплофизики — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015. — 287 с.

Книга представляет собой первую часть монографии, посвященную различным аспектам гидродинамики квантовых жидкостей. В этой части подробно излагается концепция двухжидкостной гидродинамики, основанная на теории Ландау, приводятся различные методы вывода уравнений движения, обсуждаются различные примеры течений. Особое внимание уделяется вопросам линейной и нелинейной акустики, дан обзор экспериментальных исследований. Вторая часть будет посвящена гидродинамическим явлениям в присутствии квантованных вихрей и квантовой турбулентности.

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. 63. Библ. 197 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 978-5-7692-1481-3 (часть 1)

©Немировский С. К., 2015

ISBN 978-5-7692-1480-6

©Издательство СО РАН, 2015

Оглавление

Предисловие	9
1. Гелий II – квантовая жидкость	14
2. История создания теории сверхтекучести	23
2.1. Ранние эксперименты	—
2.2. Двухскоростная (двухжидкостная) модель Лондона и Тиссы	34
2.3. Теория Ландау	38
2.3.1. Квантование движения и концепция квазичастиц	—
2.3.2. Двухскоростная (двухжидкостная) модель Ландау	49
3. Уравнения двухскоростной гидродинамики сверхтекучей жидкости	57
3.1. Метод Ландау, бездиссипативный случай	58
3.2. Вывод уравнений гидродинамики сверхтекучего гелия с помощью законов сохранения	65
3.3. Гидродинамика сверхтекучей жидкости с учетом диссипативных процессов	74
3.4. Гамильтонова форма уравнений движения кван- товой жидкости	78
3.4.1. Принцип наименьшего действия. Баротроп- ная безвихревая жидкость	—
3.4.2. Вихревые баротронные движения	80
3.4.3. Небаротронные движения	83
3.4.4. Принцип наименьшего действия в сверх- текучей жидкости	85
3.4.5. Гамильтонова форма уравнений сверх- текучей гидродинамики	88
3.5. Гамильтонова форма уравнений и нелинейная акустика	90

3.6.	Гидродинамика сверхтекучего гелия вблизи λ -точки	95
3.7.	Примеры решений задач ламинарной гидродинамики сверхтекучей жидкости	102
3.7.1.	Противоток, линейная задача, сверхтеплопроводность	—
3.7.2.	Противоток, случай больших тепловых нагрузок	104
3.7.3.	Тангенциальные силы, действующие на поверхность тела в бездиссипативном случае	106
3.7.4.	Пограничный тепловой слой	108
4.	Звуки в сверхтекучих жидкостях	112
4.1.	Исследование волновых процессов в сверхтекучем гелии	—
4.2.	Распространение звуков в сверхтекучей жидкости	116
4.2.1.	Уравнения для малых возмущений	—
4.2.2.	Два типа звуковых волн	118
4.2.3.	Свойства первого и второго звуков	123
4.3.	Тепловое зацепление и излучение звуков	125
4.4.	Загухание звуков	127
4.5.	Прохождение звуков через межфазную поверхность	129
4.5.1.	Преломление второго звука	—
4.5.2.	Отражение волны давления в паре от межфазной поверхности	132
4.6.	Звук вблизи λ -точки	135
4.7.	О распространении второго звука вблизи раздела фаз He I — He II	138
5.	Нелинейные волны второго звука в сверхтекучем гелии	144
5.1.	Особенности исследования нелинейных волн в He II	—

5.2.	Динамика интенсивных импульсов второго звука	146
5.3.	Затухающие волны. Диссипативный случай, квазипростые волны, уравнение Бюргерса	153
5.4.	Дисперсия второго звука	157
5.5.	Стационарные решения уравнения Бюргерса и КДВБ	160
5.6.	Кубически нелинейные эффекты	164
5.7.	Неоднородные волновые пакеты	166
5.7.1.	Самофокусировка монохроматической волны	—
5.7.2.	Волновые пучки в квадратичной нелиней- ной среде	169
6.	Инварианты Римана и распространение нелинейных волн	172
6.1.	Характеристическая запись уравнений нелинейной акустики	173
6.2.	Пфаффовы формы. Инварианты Римана	175
6.3.	Линейный случай	176
6.4.	Инварианты Римана в сверхтекучем гелии. Простые волны	177
6.5.	Нелинейный распад волны энтропии	181
7.	Устойчивость нелинейных волн	184
7.1.	Преобразование первого звука во второй в сверх- текучем гелии	—
7.2.	Устойчивость монохроматической волны первого звука	185
7.3.	Устойчивость ударной волны давления	190
8.	Стохастические нелинейные волновые процессы	194
8.1.	Постановка задачи, диаграммная техника Уайльда	—
8.2.	Кинетические уравнения	200

8.3. Акустические свойства турбулентного He II	211
9. Макроскопическая динамика	
конденсата Бозе — Эйнштейна	221
9.1. Теория бозе-эйнштейновской конденсации в идеальном газе	—
9.2. Бозе-эйнштейновская конденсация в ультра- холодных атомах газов	224
9.3. Макроскопическая волновая функция	226
9.4. Некоторые решения	230
9.4.1. Равновесное решение	—
9.4.2. Длина восстановления	—
9.4.3. Пристеночное решение	231
9.4.4. Звук в бозе-эйнштейновском конденсате	—
9.5. Преобразование Маделунга	233
9.6. Квантовые вихри	234
9.7. Вихри как топологические дефекты	239
9.8. Конденсат Бозе — Эйнштейна и теория сверхтекучести	241
10. Экспериментальные исследования	
по нелинейной акустике сверхтекучего гелия	243
10.1. Эксперименты по динамике интенсивных волн второго звука	244
10.2. Неоднородность, устойчивость и турбулентность	251
10.3. Некоторые экспериментальные предложения	257
Список литературы	263