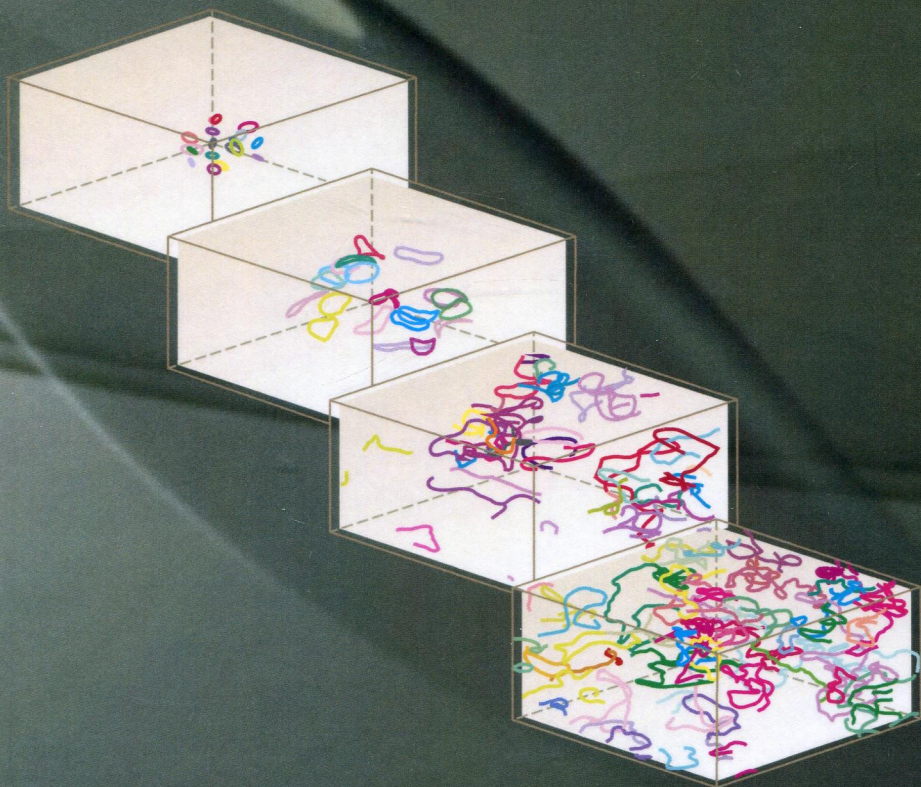


**С.К. НЕМИРОВСКИЙ**

**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. Куйбин*



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)

ISBN 978-5-7692-1480-6

©Немировский С. К., 2015

©Издательство СО РАН, 2015

# Оглавление

<b>Предисловие</b> . . . . .	<b>9</b>
<b>1. Гелий II – квантовая жидкость</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>2. История создания теории сверхтекучести</b> . . . . .	<b>23</b>
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
<b>3. Уравнения двухскоростной гидродинамики сверхтекучей жидкости</b> . . . . .	<b>57</b>
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. Небаротропные 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 $\lambda$ -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
<b>4.</b>	<b>Звуки в сверхтекучих жидкостях . . . . .</b>	<b>112</b>
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.	Затухание 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 $\lambda$ -точки . . . . .	135
4.7.	О распространении второго звука вблизи раздела фаз He I — He II . . . . .	138
<b>5.</b>	<b>Нелинейные волны второго звука в сверхтекучем гелии . . . . .</b>	<b>144</b>
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
* * *		
<b>6.</b>	<b>Инварианты Римана и распространение нелинейных волн . . . . .</b>	<b>172</b>
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
<b>7.</b>	<b>Устойчивость нелинейных волн . . . . .</b>	<b>184</b>
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
<b>8.</b>	<b>Стохастические нелинейные волновые процессы . . . . .</b>	<b>194</b>
8.1.	Постановка задачи, диаграммная техника Уайльда . . . . .	—
8.2.	Кинетические уравнения . . . . .	200

8.3.	Акустические свойства турбулентного He II . . .	211
<b>9.</b>	<b>Макроскопическая динамика конденсата Бозе — Эйнштейна . . . . .</b>	<b>221</b>
9.1.	Теория бозе-эйнштейновской конденсации в идеальном газе . . . . .	—
9.2.	Бозе-эйнштейновская конденсация в ультрахолодных 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
<b>10.</b>	<b>Экспериментальные исследования по нелинейной акустике сверхтекучего гелия . . . . .</b>	<b>243</b>
10.1.	Эксперименты по динамике интенсивных волн второго звука . . . . .	244
10.2.	Неоднородность, устойчивость и турбулентность . . . . .	251
10.3.	Некоторые экспериментальные предложения . . . . .	257
	<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>263</b>