

ШЕДЕВРЫ  
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОЙ  
ЛИТЕРАТУРЫ

Выпуск • 235

ФИЗИКА



Б. Н. Иванов

# МИР ФИЗИЧЕСКОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

ОТ ПРОБЛЕМ

**ТУРБУЛЕНТНОСТИ**

ДО ФИЗИКИ

**КОСМОСА**



URSS

НАУКУ – ВСЕМ!

Шедевры научно-популярной литературы (физика) • № 235

---

**Б. Н. Иванов**

**МИР  
ФИЗИЧЕСКОЙ  
ГИДРОДИНАМИКИ**

**От проблем турбулентности  
до физики космоса**

Издание стереотипное



**URSS  
МОСКВА**

БКК 22.253.3

**Иванов Борис Николаевич**

**Мир физической гидродинамики: От проблем турбулентности до физики космоса.** Изд. стереотип. — М.: Едиториал УРСС, 2021. — 240 с. (НАУКУ — ВСЕМ! Шедевры научно-популярной литературы (физика). № 235.)

Предлагаемая книга основана на общезначимых принципах классической гидродинамики. Обладая наглядностью понятий, она допускает обобщения на широкий круг явлений из различных областей. Так, например, рассматриваются квантовые сверхтекучие жидкости, замагниченная плазма, среды с высокой плотностью энергии. Гидродинамические модели в астрофизике и космологии позволяют осмыслить физику Солнца и звезд, механизм солнечно-земных связей, космические выбросы вещества и вспышки сверхновых, происхождение галактик и их скоплений и др. Изучение четырех глобальных стихий нашей планеты: магнитосферы Земли, ее атмосферы и океана, подкоркового расплава — мантии и жидкометаллического ядра, ведется в частности, с помощью методов физической гидродинамики. Среди общезначимых тем в работе уделено внимание проблемам неустойчивости и турбулизации движения нелинейным волновым процессам, кумулятивным явлениям.

Книга рассчитана на широкий круг лиц, интересующихся достижениями и развитием современного естествознания. Использование в книге новых идей последнего времени делает ее интересной также физикам, гидродинамикам, астрофизикам, геофизикам. Студенты и преподаватели соответствующих специальностей найдут в книге немало материала, полезного в учебном процессе.

**Рецензент:** член-корр. АН Украины, д-р физ.-мат. наук *В. П. Шелест*

Издательство «Едиториал УРСС».

117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, д. 9.

Формат 60×90/16. Печ. л. 15.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД».

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 11А, стр. 11.

**ISBN 978-5-354-01689-1**

(мягкий переплет)

**ISBN 978-5-354-01690-7**

(твердый переплет)

© Едиториал УРСС, 2002, 2020



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете если на то нет письменного разрешения владельца.

## Оглавление

Предисловие .....	8
Введение .....	10
§ 1. Неравновесные состояния сред .....	17
§ 2. Движение жидкости с высоты птичьего полета .....	18
§ 3. Течение «модельной» жидкости .....	21
3.1. Закон сохранения вещества в гидродинамике .....	21
3.2. Уравнение Бернулли возьмем за основу .....	23
3.3. Вихри и их свойства .....	25
§ 4. Течение реальной жидкости .....	28
4.1. Почему возникает торможение потока жидкости? .....	28
4.2. Пуазейлевское течение .....	30
4.3. Неравномерно нагретая жидкость .....	31
4.4. Задача, которую решал Фурье .....	32
4.5. Диффузия. Растворение кристалла в жидкости .....	33
§ 5. Взгляд изнутри: случайные процессы в газах .....	35
5.1. Пробег и сечение столкновения .....	36
5.2. Молекулярное рассмотрение процесса диффузии .....	38
5.3. Диффузия как задача о случайном блуждании частиц ..	40
5.4. Связь между случайными процессами переноса в газах .	41
§ 6. Законы сопротивления движению тел в жидкости .....	44
6.1. Метод подобия. Число Рейнольдса .....	44
6.2. Сопротивление при малых скоростях. Формула Стокса и опыты Милликена по определению элементарного электрического заряда .....	45
6.3. Сопротивление при больших (дозвуковых) скоростях. Вихревая цепочка Кармана .....	48
6.4. Подъемная сила крыла. Формула Жуковского .....	49
§ 7. Неустойчивости в гидродинамике .....	53
7.1. Когда слоистое правильное течение становится сильно запутанным? .....	53
7.2. Пограничный слой .....	55
7.3. Попытки как-то описать турбулентные движения .....	56
7.4. Переход от молекулярного к конвекционному переносу тепла. Солнечная грануляция .....	59
7.5. Течение Куэтта и тороидальные вихри Тейлора. Фейнман о возможностях гидродинамического описания .....	61
7.6. Детерминированный хаос и турбулентность .....	63

<b>§ 8. Волны на воде</b> .....	<b>68</b>
8.1. То глубоко, то мелко... ..	68
8.2. Волновая азбука .....	70
8.3. Пологие и крутые волны .....	72
8.4. Солисты в волновом хоре .....	73
8.5. Шторм на море остается загадкой .....	74
8.6. Волны звука в океане .....	74
8.7. Колебания заряженной капли или начало ядерной эры ..	76
<b>§ 9. Сверхзвуковые потоки газа</b> .....	<b>81</b>
9.1. Уравнение Бернулли и термодинамика .....	81
9.2. Когда среда становится сжимаемой? .....	82
9.3. То широко, то узко... ..	83
9.4. Сопло Лавала .....	84
<b>§ 10. Гидродинамика и физико-химические процессы</b> .....	<b>86</b>
10.1. Вводные замечания .....	86
10.2. Газовый поток и горение .....	87
10.3. Газовый поток как активная лазерная среда .....	89
10.4. Электризация грозовых облаков .....	91
10.5. Перемешивание жидкостей демонстрирует упорядоченный хаос .....	93
<b>§ 11. Знакомьтесь с ударными волнами</b> .....	<b>96</b>
11.1. С ними изредка встречаются все .....	96
11.2. Распространение возмущений в потоке сжимаемого газа ..	97
11.3. Общие соотношения для ударного скачка .....	99
11.4. Ударные волны в идеальном газе .....	102
11.5. Задача о сильном взрыве в атмосфере .....	104
<b>§ 12. Эффекты гидродинамической кумуляции</b> .....	<b>106</b>
12.1. Кумулятивные струи .....	106
12.2. Схлопывание пузырьков в жидкости .....	109
12.3. Сходящиеся сферические и цилиндрические ударные волны .....	110
12.4. Роль неустойчивостей в ограничении кумуляции. Создание сверхсильных магнитных полей .....	111
12.5. Выход ударной волны на поверхность звезды. Происхождение космических лучей .....	112
<b>§ 13. Кавитация в жидкости</b> .....	<b>113</b>
<b>§ 14. Моделирование и опыт</b> .....	<b>116</b>
14.1. Аэродинамические и плазменные трубы .....	116
14.2. Баллистические установки и ударные трубы .....	120
<b>§ 15. Эксперимент на дисплее</b> .....	<b>124</b>
15.1. Кратко об ЭВМ .....	124
15.2. Что такое численный эксперимент? .....	125

§ 16. За пределами гидродинамики .....	128
16.1. Походный термос и торможение спутников .....	128
16.2. Как можно накопить ядерное топливо .....	131
16.3. «Вакуум» в ... кристалле и гидродинамика фононов .....	132
16.4. Флуктуационные явления в гидродинамике .....	135
§ 17. Чудеса в лаборатории Капицы, или почему Ландау увлекся гидродинамикой .....	139
17.1. Жидкий гелий и квантовая механика .....	139
17.2. Жидкость, которая стоит и движется одновременно ...	143
17.3. Мысленный эксперимент Фейнмана: квантованные вихри .....	144
17.4. Сверхтекучесть в звездах и атомных ядрах .....	146
§ 18. Экзотические жидкости .....	149
18.1. О «неожиданных» свойствах классической жидкости. О квантовой турбулентности. О путях обобщения гидродинамики .....	149
18.2. Электронная жидкость металлов .....	151
18.3. Экситонная жидкость полупроводников .....	152
18.4. Течения полимерной жидкости .....	155
§ 19. Исследования по управляемому термоядерному синтезу (УТС) и магнитная гидродинамика. Турбулентное динамо Земли и Солнца. Нелинейные явления в плазме .....	159
19.1. Самостягивающийся разряд и его гидродинамическая неустойчивость .....	159
19.2. Как возникают и «живут» магнитные поля звезд и планет	163
19.3. О «карнавале» колебаний и волн в магнитной гидродинамике .....	165
19.4. Нелинейные волновые эффекты в плазме и их аналоги в гидродинамике, акустике, оптике .....	166
19.5. Волновая турбулентность плазмы .....	169
§ 20. О солнечно-земных связях и геофизической гидродинамике ...	173
20.1. Вводные замечания .....	173
20.2. Солнце — плазменное образование и природный термоядерный реактор .....	174
20.3. Магнитосфера Земли .....	178
20.4. Атмосфера и океан. Задача о вращающейся жидкости ..	181
§ 21. Мир сверхвысоких плотностей энергии и релятивистская гидродинамика .....	187
§ 22. Крупномасштабная гидродинамика Вселенной .....	191
22.1. Основные этапы эволюции Вселенной .....	191
22.2. Иерархия структур во Вселенной .....	194
22.3. Гидродинамические процессы при формировании структур Вселенной .....	196

<b>Приложение</b>	199
<b>Очерки к параграфам</b>	200
<b>Астрофизика</b>	200
Космические выбросы вещества: объект SS 433 и его теоретическая модель. (К § 21)	200
Механизм гидромагнитного динамо в космических структурах. (К § 19.2)	205
Мазерный эффект в космосе. (К § 10.3)	207
О жидкой планете, похожей на звезду. (К § 20.4)	209
<b>Геофизика и солнечно-земные связи</b>	210
Торнадо: его топология, физика и гидродинамика. (К § 20.4)	210
О солнечной сейсмологии и акустическом зондировании океанов и мантии Земли. (К § 20.4)	212
<b>Физика плазмы</b>	215
Самоподдерживающийся режим «горения» термоядерной плазмы. (К § 19.1)	215
Кумулятивное сверхсжатие лазерной плазмы. (К § 19.1)	217
«Серфинг» на плазменной волне — новый метод ускорения частиц. (К § 19.5)	219
<b>Физико-техническая область</b>	221
Нелинейная среда становится антенной. (К § 19.4)	221
Пузырьковые камеры в физике частиц высоких энергий. (К § 13)	222
«Окна» для газодинамических лазеров. (К § 10.3)	223
Магнитогидродинамический генератор (МГД-генератор). (К § 9.4)	225
Роль «капельной физики» в эффективной работе газодинамических двигателей (ГД). (К § 10.2)	226
<b>Ударные волны</b>	229
К истории учения об ударных волнах. (К § 11.2)	229
Расчет ударного скачка в газе. (К § 11.4)	229
<b>Задача о скорости звука (К § 21)</b>	232
<b>Литература</b>	234
<b>Общее руководство</b>	234
<b>Литература к параграфам</b>	234
К § 6. Законы сопротивления...	234
К § 7. Неустойчивости в гидродинамике	234
К § 8. Волны на воде	234
К § 10. Гидродинамика и физико-химические процессы	235
К § 11. Ударные волны	235

---

К § 12. Гидродинамическая кумуляция .....	235
К § 13. Кавитация .....	235
К § 14. Моделирование и опыт .....	236
К § 15. Эксперимент на дисплее .....	236
К § 16. За пределами гидродинамики .....	236
К § 17. Сверхтекучая жидкость .....	236
К § 18. Экзотические жидкости .....	237
К § 19. Исследования по УТС и магнитная гидродинамика. Турбулентное геодинамо. Нелинейные явления в плазме .....	237
К § 20. О солнечно-земных связях и геофизической гидродинамике .....	238
К § 21. Мир сверхвысоких плотностей энергии и релятивистская гидродинамика .....	238
К § 22. Крупномасштабная гидродинамика Вселенной ..	239
<b>Литература к Приложению .....</b>	<b>239</b>